

工學碩士 學位論文

정적연소기에서의 LPG  
충돌분무확산화염에 대한 연구  
Analysis of LPG Spray Diffusion Flame  
in Constant Volume Combustion Chamber

指導教授    朴   權   夏

2002年   8月  
韓國海洋大學校   大學院  
機   械   工   學   科  
蘇   秉   斗

蘇秉斗의 工學碩士 學位論文을 認准함

委 員 長 工學博士 최 재 성 ㉠

委 員 工學博士 정 동 수 ㉠

委 員 工學博士 박 권 하 ㉠

2002年 8月

韓國海洋大學校 大學院

機 械 工 學 科

蘇 秉 斗

# 目 次

## ABSTRACT

### I. 序 論

1.1 연구의 배경 및 목적	1
-----------------	---

### II. LPG 연료의 성질

2.1 LPG연료의 물리적 성질	5
2.2 LPG연료의 연소	8

### III. 實驗裝置 및 方法

3.1 실험장치의 구성 및 실험조건	9
---------------------	---

### IV. 實驗結果 및 考察

4.1 LPG 분무확산연소특성	12
4.1.1 분위기압력변화에 따른 연소특성	12
4.1.2 분사압력변화에 따른 연소특성	15
4.2 가솔린 분무확산연소특성	30
4.2.1 분위기압력변화에 따른 연소특성	30
4.2.2 분사압력변화에 따른 연소특성	32

4.3	디젤 분무 확산연소특성-----	46
4.3.1	분위기압력변화에 따른 연소특성-----	46
4.3.2	분사압력변화에 따른 연소특성-----	47
4.4	LPG, 가솔린, 디젤의 분무연소특성 비교-----	67
4.4.1	분무와 착화특성-----	67
4.4.2	연소특성-----	70
V.	結 論-----	72
	參考文獻-----	74

# ABSTRACT

Analysis of LPG Spray Diffusion Flame  
in Constant Volume Combustion Chamber

Byoung-Doo So

Department of Mechanical Engineering, Graduate School  
Korea Maritime National University  
Busan, Korea

(Supervised by Professor Kweonha Park)

The need for more fuel efficient and lower emission vehicles has driven the technical development of alternative fuels such as Liquefied Petroleum Gas which is able to meet the limits of better emission levels without many modifications to current engine design. This study addresses the LPG spray and diffusion flame in a constant volume combustion chamber which has an impinging plate. The spray and flame images are visualized and compared with diesel and gasoline sprays in the condition of wide ambient gas pressure ranges. The high speed digital camera is used to take the flame images. The injection pressure is generated by Haskel air

driven pump, and the trap pressure is adjusted by pumping air into a constant volume chamber. The LPG spray and flame photographs are compared with those of gasoline and diesel fuel at the same conditions, then the spray and flame development behavior is analyzed. The LPG spray photos show that the dispersion characteristics depend very sensibly on the ambient pressure soon after injection. In a low trap pressure, LPG fuel in liquid phase evaporates quickly and does not reach down easily to the impinging plate having a hot coil for ignition. Those make the temperature and the equivalence ratio very low near the ignition coil and then make the ignition hard. On the other side, a high trap pressure case, the spray leaving the nozzle is remaining as liquid phase like a diesel fuel spray. The LPG gather around the ignition site on the plate, which makes an intensive flame near the plate. It is considered that the behavior of LPG spray might be more dependent on the gas flow motion than the spray injection velocity in the cylinder with low trap pressure. That phenomenon will be appear easily on the early injection of a direct injection LPG engine. Therefore, the chamber and intake port shape might be careful to get a suitable flow motion for a direct injection LPG engine design.

# I. 序 論

## 1-1. 연구의 배경 및 목적

디젤과 가솔린을 주원료로 사용하는 수송기계원동기에서 배출되는 배기가스는 대기오염의 주원인이 되고 있다. 선진국을 중심으로 대기 환경 개선을 위한 규제가 강화되고 있으며, 규제만족을 위한 기술개발이 활발히 이루어지고 있다. 대체연료기술은 이러한 연구중의 하나로 LPG연료는 안전성과 효율성을 검증 받아 수송기계의 대체연료로서 널리 사용되고 있다. LPG는 단순한 화학 결합과 고옥탄가에 의하여 열효율을 향상시키고 불완전연소에 의한 배기 배출물을 저감시키며 CO<sub>2</sub>의 배출을 줄일 수 있기 때문에 청정연료로서 구분된다. 이러한 장점으로 인하여 사용이 점차적으로 증가하고 있다. LPG엔진은 불꽃점화의 방식이 가능하며 저압에서도 쉽게 액화되는 성질을 가지고 있기 때문에 현재의 가솔린엔진기술을 그대로 적용할 수 있다. 그러나 수송기관에 LPG공급 시 공기, 연료의 불균일에 따른 유해배출가스의 발생과 흡기관에 잔존하는 다량의 혼합기로 인한 역화 등 많은 문제가 있다. LPG는 연료사용방식에 따라 LPG연료만을 사용하는 전용방식과 가솔린과 LPG를 교대로 사용하는 Bi-fuel, Diesel연료와 LPG를 동시에 사용하는 Dual-fuel 방식이 있다. 국내의 LPG차량은 LPG 연료만을 사용하며 북미나 일본 등에서는 대형상용차에 Dual-fuel방식을 사용한다. Poulton [1]은 Dual-fuel방식에 대하여 매연 저감효과가 매우 우수한 것으로 보고하였다. 이지근 등[2]은 LPG와 가솔린의 효율에 대해 비교하였는데 LPG차량에 공급되는 연료인 LPG의 단위 중량당 발열량은 가솔린보다 약간 크지만 혼합기의 단위 체적당 발열량은 밀도의 차이로 인하

여 가솔린보다 5%정도 작다고 보고하였다. 또한 LPG는 가스상태로 엔진에 공급되기 때문에 흡입효율저하에 의한 출력저하(가솔린 대비 약 6%정도)가 발생하고, 흡입 공기량이 적은 저속에서 보다 흡입 공기량이 많은 고속에서 출력은 5~10%정도 저하한다고 발표하였다.

LPG엔진의 최근연구는 흡기포트에 분사하는 방식(MPI)과 연소실내에 직접 분사하는 방식으로 나누어진다. 흡기포트 분사방식은 가솔린에서 사용되고 있는 MPI방식과 유사하다. 따라서 가솔린엔진의 흡기포트 분사식 공급장치와 같은 성능을 보여주는지에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다. Hollemans [3]는 LPG가 Cold Start시 효과가 크다고 했으며 유해배기가스저감을 보고하였다. 배기가스저감에 관한 연구에서 Lowi Jr [4]는 유해배기가스인 NOx, CO<sub>2</sub>등이 가솔린기관과 비교하여 20~60%의 감소를 보고하였고 Hollemans 등 [3]은 46.4%의 감소를 Smith 등[5]은 0.6~0.8%의 감소를 발표하였다.

디젤기관과 비교해서 영국의 Rushmoor Borough의회 [6]는 유해가스인 NOx가 80%, PM이 100%감소함을 보고하였고 홍콩환경사무국 [7]에서는 95%의 NOx 감소를 발표하였다. 따라서 LPG가 다른 연료와 비교하여 청정연료로서 유해물질을 감소시켜 환경오염에 기여할 수 있다는 것을 입증하였다.

기존에 나와 있는 연료공급방식과는 다른 액상분사장치에 대한 연구에서 Sierens [8]는 많은 실험과 이론적 연구를 통한 MPI분사시스템을 개발하였다. 액체분사시스템이 증발식 LPG엔진과 비교하였을 때 15%의 출력향상을 보이며, 가솔린과 비교하여 유사한 출력을 보여준다. 또한 연료소비량 및 배기가스가 감소된다고 발표하였다.

오승묵 등[9]은 단기통엔진을 사용하여 대형엔진에 LPG연료의 적용가능성을 확인하였다. 믹서혼합방식, 액상분사방식과 가스분사 방식에 따른 엔진 실험 결과를 상호 비교한 특징을 보면 직분식 LPG의 경우 흡기 온도 저감에 의하여 믹서방식의 경우보다 약 10%정도 출력증가를 보여주며 배기가스 온도의



저감, 이상연소 현상억제 등의 효과를 보여주었다. LPG는 낮은 압력 조건에서 급속히 증발하는 급속 증발특성을 가지고 있는데 디젤이나 가솔린에서는 이러한 특성을 찾아볼 수 없다. Brown과 York [10]의 논문에서는 LPG분사과정에서의 급속증발(flawing)을 관찰하였고 Fusimoto 등[11]은 미립화 특성을 분석하였다.

정동수 등[12]은 직접분사식 LPG엔진에서의 분사조건이 분무특성에 미치는 영향을 연구하였는데 가솔린과 비교하여 분사시기 변화에 따른 LPG의 분무특성은 분사시기가 빠를수록 분무의 관통도가 증가하였고 반면에 분무각은 감소하였으며 분무초기에 비해 후반으로 갈수록 분무각이 줄어들었으며 일정하게 유지됨을 보여주었다. 그러나 분사압력변화에 따른 분무특성은 가솔린에 비해 거의 차이가 나타나지 않았다.

LPG의 연소특성에 관하여 김우석 등[13]은 LPG가 부분부하 실험에서 가솔린에 비해 MBT 점화시기가 약 2~4°지각되어 나타났고, 연소기간이 기관회전속도 증가에 따라 가솔린보다 10%이상 단축되어, 노킹 발생시간을 줄이며, 그에 따른 고 압축비가 가능하고 이에 따라 이론열효율이 상승하는 효과가 있다고 발표하였다. 전 부하상태에서는 LPG연료를 사용할 경우 노킹 한계 점화시기가 가솔린의 경우보다 5~10°이상 진각 될 수 있어 가스연료 사용에 대한 고 부하 영역에서의 출력 감소를 보상할 수 있다고 하였다.

LPG 엔진의 개발에 관한 연구로서 서영호 등[14]은 디젤엔진과 비교하기 위해 중형 상용 LPG 엔진을 제작하여 배기, 연비, 출력 등의 성능 시험을 실시하여 최대토크 13%, 최대 출력 6%증가를 보여주었고 Hollemans 등[3]은 엔진 효율면에서 4%향상을 Sun 등[15]은 4%악화 Fanick 등[16]은 5%악화를 보여주었다. 또한 강우 등[14]은 엔진에서의 전개상태인 WOT조건에서 연료소비율은 디젤엔진대비 단위 중량당 연료 소비가 10~20% 정도 증가하였는데 이를 단위 가격당 비교한다면 디젤 엔진과 동등한 수준으로 평가하였다.

이상의 연구들을 종합하면 LPG연료를 사용할 때 기존의 가솔린, 디젤기관과 비교하여 유해배기 가스가 감소되며 연료 소비율이 경제적인 반면, 최대 출력 저감과 엔진열효율향상에 대한 문제를 안고 있다. 출력향상을 위해서 고옥탄가 특성을 이용하여 점화시기를 진각 시키는 연구가 진행되고 있지만, LPG연료의 특성인 급속증발과 혼합 및 급속연소 등을 명확히 이해할 필요성이 있다. 본 논문에서는 실린더 내에 직접분사 하는 방식의 LPG엔진연소에 관한 기초자료확보를 위하여 분사압력과 분위기 압력이 변화 할 때의 LPG연소특성을 가솔린, 디젤 연료의 연소와 비교분석 하고자 한다. 본 실험에 사용된 LPG는 프로판 30%, 부탄 70%가 혼합되어진 연료를 사용하였다.

## Ⅱ. LPG연료의 성질

### 2-1. LPG연료의 물리적 성질

LPG는 대기 환경오염 물질의 감소를 위하여 대체연료로 사용되고 있으며 그 밖에도 LPG가 가진 고옥탄가 특성 등으로 인해 1990년대 초반부터 그 활용가치가 급속히 증가되고 있다.

LPG의 구성은 원유의 정제나 채굴과정에서 생기는 기체상태의 탄화수소를 액화시킨 혼합물로써, 프로판(Propane)과 부탄(Butane)으로 구분되어 진다. 프로판( $C_3H_8$ )은 소량의 메탄, 에탄, 부탄 등이 혼합되어 있고 가정용과 도시가스의 원료로 주로 공급된다. 부탄은 노말부탄( $n-C_4H_{10}$ ), 이소부탄( $i-C_4H_{10}$ ) 등이 주성분이며, 프로판 등 타성분과 혼합하여 주로 자동차용 연료로 사용되며 일부는 난방용 연료 및 석유화학 원료로도 사용한다. LPG의 물리적인 특성을 살펴보면 LPG는 액화 및 기화가 용이하다. 즉, 프로판의 경우 대기압 상태에서  $-42.1^{\circ}C$ ,  $7kg/cm^2$  이상으로 압력을 가하면 쉽게 액화되며, 부탄은  $-0.5^{\circ}C$ ,  $2kg/cm^2$ 로 액화시킬 수 있다. 엔진의 기화기(베이퍼라이저)가 작동하려면 약  $0.3kg/cm^2$ 의 연료압력이 필요한데 외기온도가 약  $-15^{\circ}C$  이하로 되면 기화기의 원활한 작동이 불가능해 시동이 어려워진다. 이와 같은 특성으로 인하여 겨울철에는 시동을 하는데 어렵기 때문에 프로판의 혼합비율을 높여(프로판30%, 부탄 70%) 기화기의 작동에 필요한 증기압을 확보한다. 또한 LPG는 액화시키면 (프로판=약 270분의1, 부탄=약 240분의 1)로 부피가 감소하기 때문에 수송과 저장이 용이하다. LPG는 액화상태에서 기체상태로 기화되면 공기보다 무겁고, 액화하면 물보다 가벼운 특성을 가지고 있으며 공기 중에서는 연소한계

농도가 낮아 누설이 될시 공기보다 무거운 특성으로 인해 바닥에 모여 화재 또는 폭발의 위험성이 존재하기 때문에 안전장치를 설치하여 사고를 미연에 방지를 해야 한다. LPG는 무색, 무취이기 때문에 누설로 인한 사고를 감지하기 위해서 소량의 첨가제를 첨가하여 누설로 인한 많은 인명피해나 사고를 방지해야 한다. 보통 머캡탄이나 CP-630(황화합물)이 LPG착취제로 사용된다. 또한 LPG는 기화잠열이 높아 기화시킬 때 많은 기화열이 필요한데 프로판 1Kg을 기화하기 위해서는 101.8Kcal의 열량(기화열)을 필요로 하며, 부탄 1Kg의 기화를 위해서는 92.1Kcal의 열량(기화열)이 필요하다. 연소 시 다량의 공기가 필요한데 프로판은 25배, 부탄은 32배 용량의 공기가 필요하다. 따라서 불완전 연소시 일산화탄소의 생성이 우려되기 때문에 주의가 요구된다.

Table 1.1 Properties of LPG, Diesel, Gasoline

Fuel	Propane	Butane	LPG(used)	Diesel	Gasoline	
Formula	$C_3H_8$	$C_4H_{10}$	propane(30%)+ butane (70%)	$C_{10.8}H_{18.7}$	$C_{8.26}H_{15.5}$	$C_{7.76}H_{13.1}$
Mol.wt (Kg/kmol)	44.096	58.123	53.915	148.6	114.8	106.4
Boiling pt. ( $^{\circ}C$ )	-42.1	-0.5	-12.98	180-360	27-225	
Ignition pt. ( $^{\circ}C$ )	-104	-60	-73.2	65-80	-42.8	
Autoignition pt. ( $^{\circ}C$ )	481	441	453	350-450	500-550	
Liquid density( $kg/m^3$ )	500	579	555	845	775	

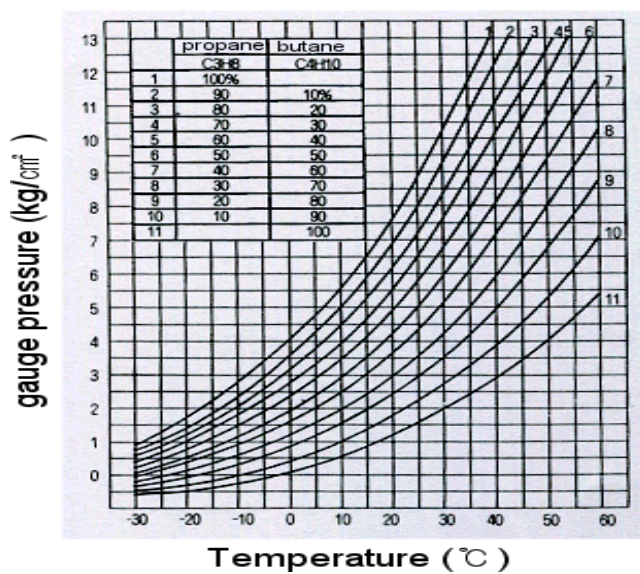


Fig. 1.1 Vapor pressure variation

## 2-2. LPG연료의 연소

일반 LPG엔진의 연료공급계통과 연소를 살펴보면, LPG탱크에서 나온 액체연료는 베이퍼라이저에서 기화한 후 공기와 혼합이 되어 흡기관에 공급된다. LPG는 공기와 빠르게 혼합되어 엔진에 공급되기 때문에 액체의 상태로 공급되는 가솔린이나 디젤연료에 비해 연소속도가 빠르며, 과잉 공기율이 낮아도 넓은 확산에 의하여 주위 산소를 충분히 이용할 수 있기 때문에 완전연소에 접근하는 특성을 갖고 있다. LPG를 실린더에 직접 분사하는 경우에도 LPG급속증발 및 혼합특성에 의하여 빠른 연소를 보여 줄 것으로 예상된다.

### Ⅲ. 실험장치의 구성 및 실험조건

#### 3-1. 실험장치의 구성 및 실험조건

Fig. 3.1은 충돌 분무의 확산 화염을 실험하기 위한 장치도이다. 본 실험장치는 연료공급장치와 가시화 장치로 구분된다. 연료공급장치는 연료저장탱크, 하스켈 펌프, 고압저장탱크, 전자밸브와 분사기로 구성된다. LPG와 액체연료를 적절히 공급하기 위하여 LPG압력탱크와 액체연료저장탱크로 구분하였으며 연료의 공급은 각각의 밸브를 열어 조절한다. 공급된 저압의 액체연료는 공기구동식 하스켈펌프에 의하여 150MPa까지 고압으로 압축된다. 고압의 연료는 고압탱크에 저장된다. 분사신호가 작동되면 power supply에서 고압의 전원을 전자밸브에 순간적으로 전달하여 고압연료를 분사기에 공급하게 되고 정적연소기에 분사하게 된다. 가시화 장치는 광원과 고속카메라 및 데이터 처리 장치로 구성된다. 광원은 1KW 텅스텐 램프로 정적 연소기 뒷면에 설치하여 연속광을 비춘다. 658×496 SR1000C 모델의 고속카메라는 전자밸브작동신호를 받아 3000f/s의 속도로 작동한다. 연소실험형상은 Fig. 3.2와 같다. 분사노즐로부터 105mm 떨어진 곳에 충돌면을 두며 충돌면의 외곽에 연료의 충돌과 동시에 확산연료의 점화를 위하여 789K의 가열코일을 설치하였으며 분위기 온도를 500K로 유지하였다. 연소실 중앙상단에는 0.22mm 단공노즐을 설치하였다. 실험조건은 분위기 압력을 0.1, 0.4, 0.7, 1.0MPa로 변화를 시켰으며 분사압력은 10, 15, 25, 50, 100, 150MPa로 하였다.

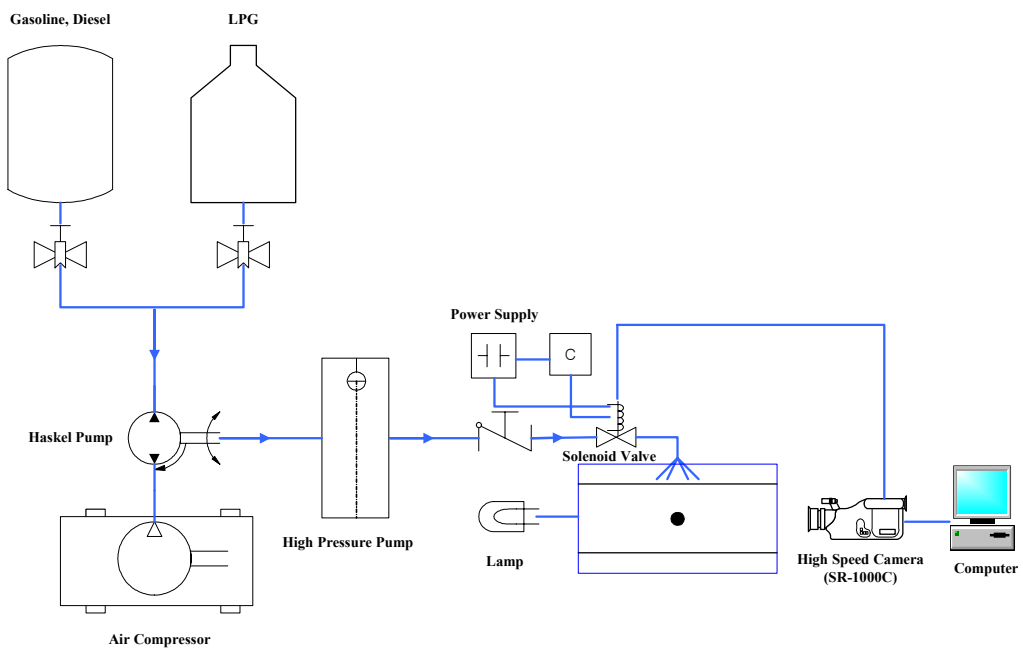


Fig. 3.1 Experimental Setup



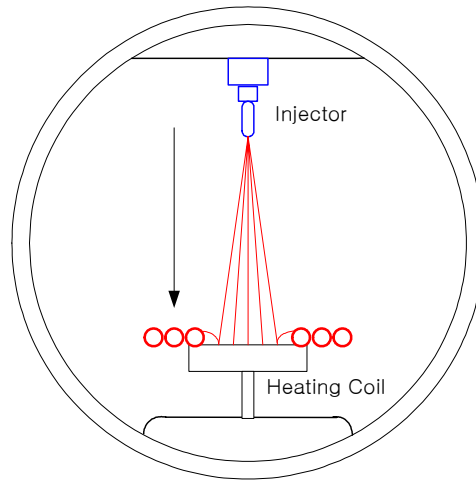


Fig. 3.2 Combustion Chamber Geometry

Table 3.1 Test cases

Fuel (LPG, Gasoline, Diesel)			
Trap pressure(MPa)	Trap temperature(K)	Impinging plate distance(mm)	Inner heating coil diameter(mm)
0.1, 0.4, 0.7, 1.0	500	105	95
noz. hole dia.(mm)	Nozzle type	Rail pressure(MPa)	Liquid temperature(K)
0.22	Single hole	10,15,25,50,100,150	280

## IV. 실험장치의 구성 및 실험조건

### 4.1 LPG 분무확산연소특성

#### 4.1.1 분위기 압력 변화의 영향

Figs. 4.3~9는 분사압력 10MPa, 분위기 온도 500K에서 분위기 압력이 0.1~1.0MPa인 경우에 분무가 충돌판에 충돌과 동시에 화염의 전파 후 연소의 소멸까지의 과정을 동시에 가시화한 사진이다. Fig. 4.3, 4, 6, 8은 분무진행거동을 보여주는데, 분사 전 280K, 10MPa로 압축된 액체 LPG는 낮은 압력의 고온분위기에 급격히 노출된다. 분위기 압력이 낮은 0.1MPa의 경우 분사된 LPG가 노즐근처에 머무르면서 아래로 진행되지 않고 있으며 1.67ms 이후에 급격히 진행됨을 알 수 있다. 분위기 압력이 0.4MPa이상이 되면 이러한 현상이 사라지며 분사직후부터 빠른 분무진행을 나타낸다.

Fig. 4.14와 같이 LPG의 상변화 경로를 보면 초기 상태의 액체 LPG가 분사되면 비교적 매우 느린 열전달에 의하여 무시할 수 있는 온도 상승과 함께 포화액점( $R_{2-1}$ )을 지나 등엔탈피팽창점( $R_{1-1}$ )에 이르게 되고 등온가열과정을 거쳐 포화증기점( $R_{3-1}$ )에 이르면 완전 증발되며 최종상태인 주위 조건( $S_{2-1}$ )에 이르게 된다. 주위공기 압력이 높아지면( $S_{2-2}, S_{2-3}, S_{2-4}$ ) 분사된 액체 LPG에 미치는 압력이 주위공기 압력까지는 급격히 낮아지지만, 이 압력이 포화압력 보다 높은 상태에 있기 때문에 아직 액체 상태( $R_{1-2}, R_{1-3}, R_{1-4}$ )이다. 고온의 주위 상태에서 열을 받아들여 포화액점( $R_{2-2}, R_{2-3}, R_{2-4}$ )에 이른 후 포화증기점( $R_{3-1}, R_{3-2}, R_{3-3}$ )

을 거쳐 증발하여 최종상태( $S_{2-2}, S_{2-3}, S_{2-4}$ )에 이르게 되는데 가열과 함께 포화압력도 상승하기 때문에 가열된 액체LPG의 포화압력이 분위기압력보다 높아지게 되면 이때부터는 Fig. 4.3의 경우와 같은 전체급속증발이 이루어진다. 하지만 분위기 압력이 초기온도에서의 포화증기압보다 높기 때문에 늦은 증발현상을 나타낸다. 이를 급속증발(flash vaporizing)이라 하여 전체급속증발과 구분한다.

Fig. 4.3의 경우의 LPG 증발과정은 주위온도 280K, 10MPa로 압축된 액체 LPG가 500K, 0.1MPa의 분위기 상태로 분사되면 분사와 동시에 증기와 액체의 혼합구역(액기혼합상태)로 떨어지게 된다. 0.1MPa의 압력은 280K, LPG의 포화압력 0.27MPa보다 낮기 때문에 분사된 LPG가 등엔탈피 팽창점의 액체 83.6%와 증기 16.4%의 혼합상태로 변화되면서 급속히 증발하게 된다. 본 논문에서는 이를 전체 급속 증발 효과 (whole flashing effect)라 명칭 하였다.

Fig. 4.3이 분위기 압력 0.4MPa보다 매우 낮은 대기압 상태에도 불구하고 오랫동안 분무진행이 이루어지는 것은 전체 급속 증발 효과로 인한 것이며 분사 온도 280K의 포화압력보다 큰 경우의 분위기 압력에서는 분위기 압력의 증가와 함께 분무진행이 느려지는 것을 알 수 있다. 그러나 분위기 압력이 0.7, 1.0MPa에서 진행거리의 차이가 작은 것은 분사 후 어느 정도시간에서 액적으로의 열전달에 의한 증발의 급속한 증가에 의하여 분무의 진행이 매우 늦어지기 때문이다. Fig. 4.15는 이를 명확하게 보여준다.

Figs. 4.5 ,4.7, 4.9의 연소특성을 살펴보면 분위기 압력이 0.1MPa인 대기압 상태에서는 다른 분위기 압력변화에서와 다르게 점화에 어려움이 있었는데. 이에 대한 원인으로는 ①전체급속증발에 의하여 고압으로 분사된 LPG가 급속히 증발확산됨으로써 분사속도가 급격히 감소하여 점화위치인 가열코일의 밑면 충돌부에 도달하는 연료가 작아 연소에 필요한 당량비를 얻지 못한 효과, ②낮은 압력에서 급속확산에 의한 활성기들의 벽면흡착, ③등엔탈피 팽창에

의해 매우 낮은 온도가 형성된 것을 들 수 있다. 하지만 분위기 압력이 0.4MPa 이상이 되면 연소가 시작되는 데에 큰 문제는 없다. 분위기 압력 0.4MPa에서 점화는 연소실 좌측하단의 점화코일에서 시작됨을 알 수 있으며 점화된 화염이 그 주위에서 작은 화염을 형성한 후 소멸된다. 이후 압력이 높아지면 점화후 활발한 연소가 진행되며 분무축을 따라 노즐을 향하여 타고 올라가는 것을 알 수 있는데 이는 주위공기압력의 증가와 함께 많은 연료가 충돌면까지 진행함을 보여준다. 또한 모든 경우에 가시화창의 오염없이 깨끗하게 연소가 끝난다.

## 4.1.2 분사압력 변화의 영향

엔진에 연료의 압력을 고압화하면 분무 도달거리 및 분무각이 증가하고 분무 속도 증가에 따른 연소실내 공기와의 전단력이 증가하여 미립화와 동시에 공기 이용률도 증가하게 된다. 이로 인하여 공기와의 혼합이 촉진되어 착화지연 시간, 확산 연소시간 그리고 후 연소기간이 감소되고 연소효율도 개선되어 배기가스의 감소를 할 수 있는 중요한 요소로 작용한다. 또한 분사압력이 고압화 됨에 따른 연료의 분무특성 및 연소특성의 경우가 확연히 다르기 때문에 이에 대한 해석 및 기초자료의 정립이 이루어져야 한다.

Figs. 4.8~4.13은 각각 분위기 압력 1.0MPa에서 분사압력이 10, 15, 25MPa 일때 시간의 변화에 따른 분무와 화염의 거동을 보여준다. 분사압력의 증가와 함께 분무진행거리가 증가하고 분무폭의 증가를 보여주고 있지만 미세한 차이점을 보여주고 있다. 이는 역시 분사후 일정시간이 지나면 분무액적의 가열과 증발의 활성화특성에 의하여 분무진행을 둔화시키기 때문이라고 생각된다 (Fig. 4.16). 연소화염의 발달은 분사압력의 영향이 매우 크다. 압력이 증가하면 점화와 함께 더욱 강렬한 자발광을 동반하면서 급속하게 화염이 연소실내에 전파된다. 실험에 쓰인 분사압력은 각각 10, 15, 25MPa의 압력을 주어 그 분사 압력에 따른 연소특성에 대하여 실험을 하였다. 분위기 압력 1.0MPa에서 10, 15, 25MPa의 분사압력에서의 시간의 변화에 따른 분무와 화염의 전파과정을 연소사진을 통해 비교해보면 10, 15MPa의 경우는 최초화염의 생성이 가열 코일의 좌측면 하단에서 발달이 되었으며 25MPa의 경우는 우측면 하단에서 생성이 되었다. 10MPa, 15MPa의 경우는 연소화염이 연소실 좌, 우 측면을 따라서 전파를 하다가 연소실 중앙부분에 머무른 후 서서히 소멸되는 현상을 보

여주고 있다.

10, 15MPa는 분사압력이 낮기 때문에 분사된 연료가 확산이 되지 못하고 대부분 충돌판에 충돌하여 연료가 상당부분 증발하기 때문에 연소 또한 연소기 내부에 확산됨이 감소되는 것으로 보여진다.

반면 25MPa는 정적연소기 내부에서의 연소화염은 분사가 된 후 분무가 Heating Coil에 충돌과 동시에 정적연소기 내부에서 강렬한 빛과 함께 연소기 내부에서 급속히 확산이 되는데 화염은 Heating Coil의 우측면 하단으로부터 서서히 발달함과 동시에 모든 가스가 연소될 때까지 정적연소기의 좌측면과 우측면 벽쪽으로 서서히 진행을 하다가 연소실의 중심으로 급속히 화염이 전파되는 것을 보여주고 있다.

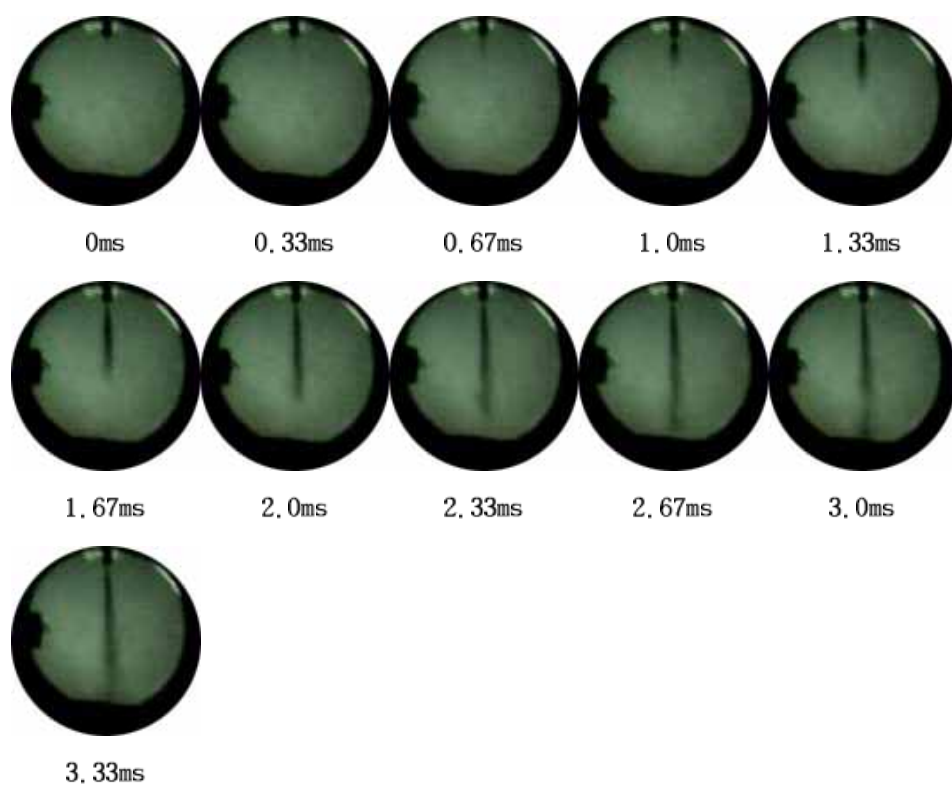


Fig. 4.3 LPG spray development (Rail pressure 10MPa-Trap pressure 0.1MPa)

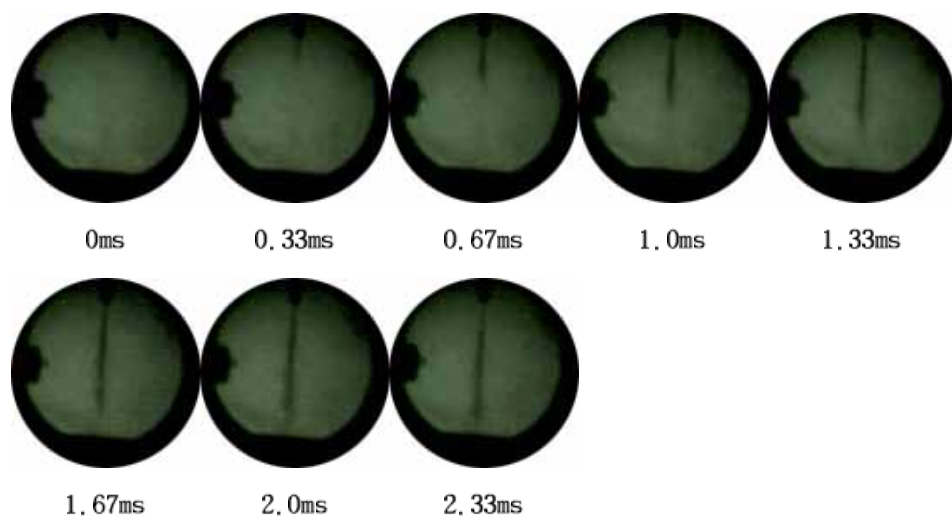


Fig. 4.4 LPG spray development (Rail pressure 10MPa–Trap pressure 0.4MPa)



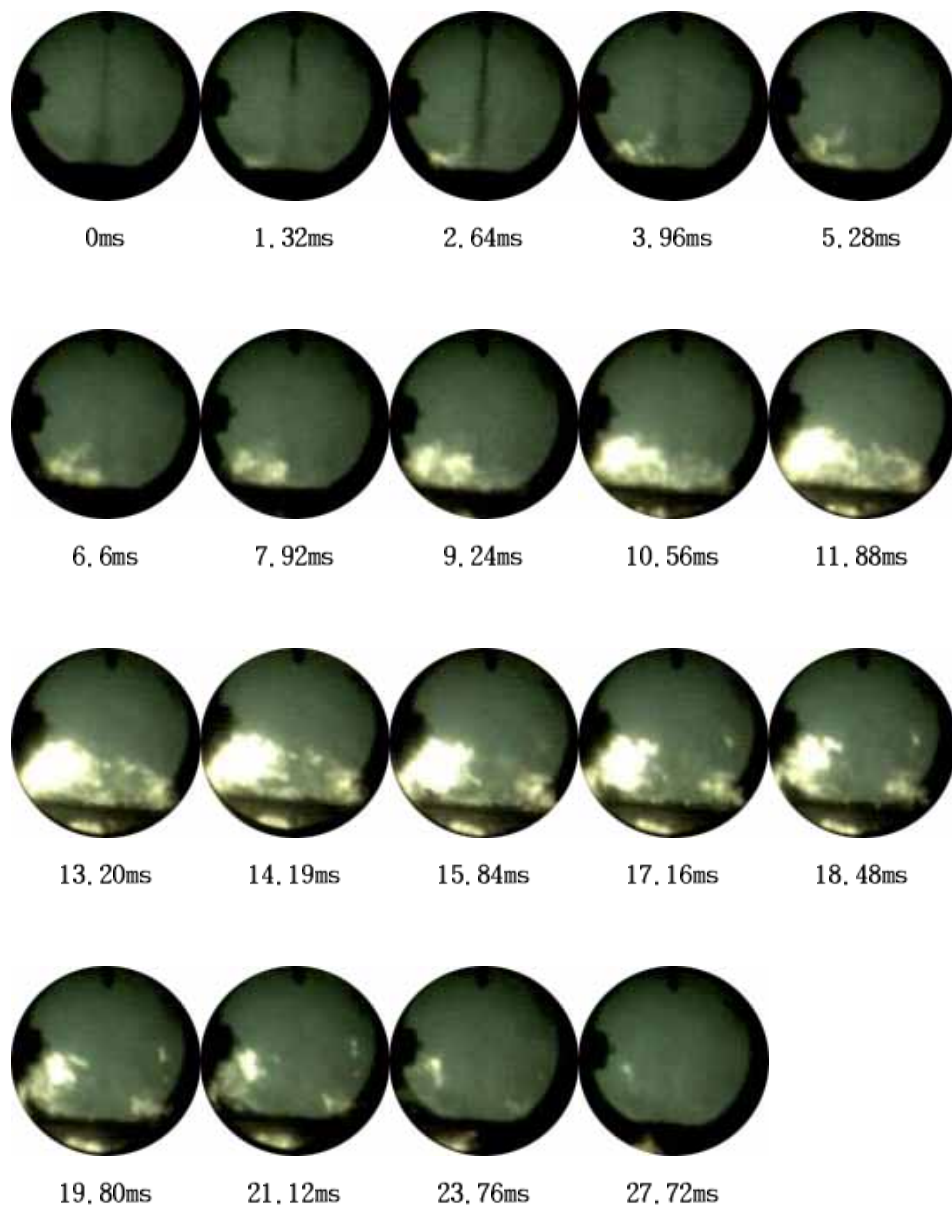


Fig. 4.5 LPG flame development and termination  
(Rail pressure 10MPa-Trap pressure 0.4MPa)

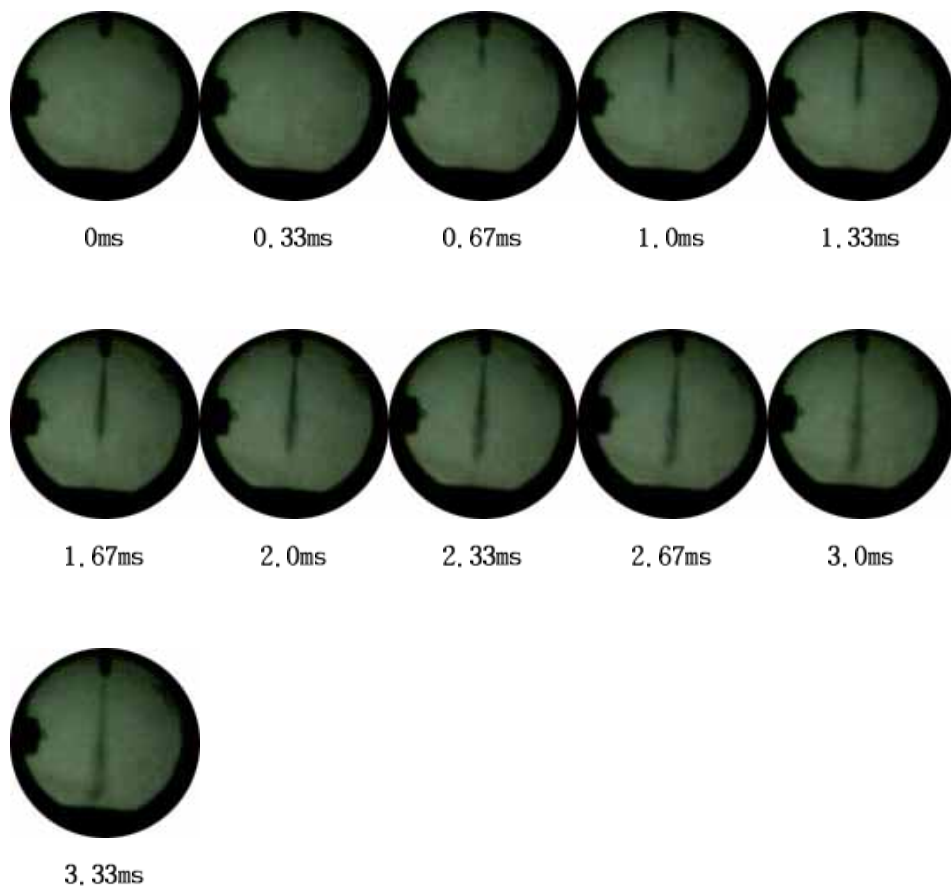


Fig. 4.6 LPG spray development (Rail pressure 10MPa–Trap pressure 0.7MPa)

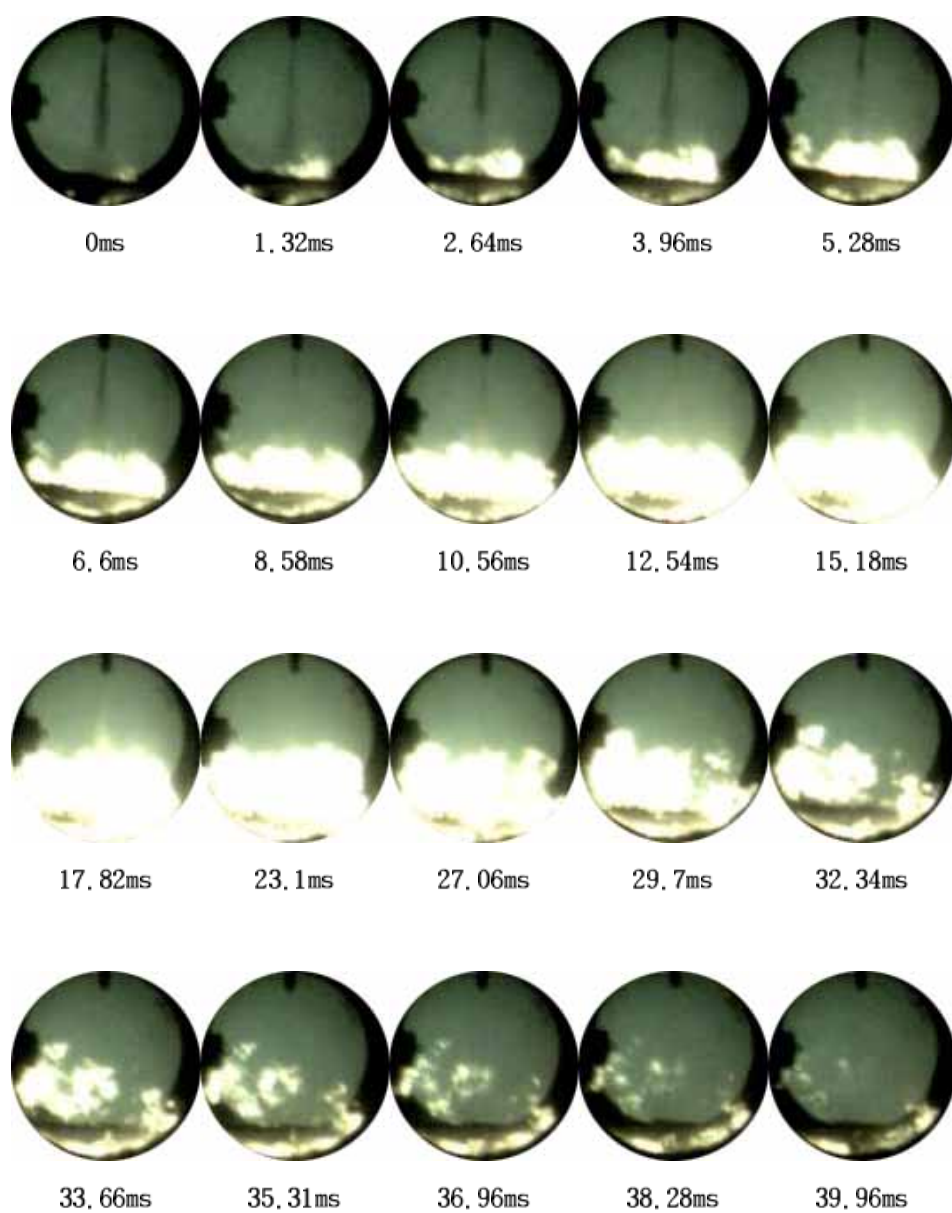


Fig. 4.7 LPG flame development and termination  
(Rail pressure 10MPa-Trap pressure 0.7MPa)

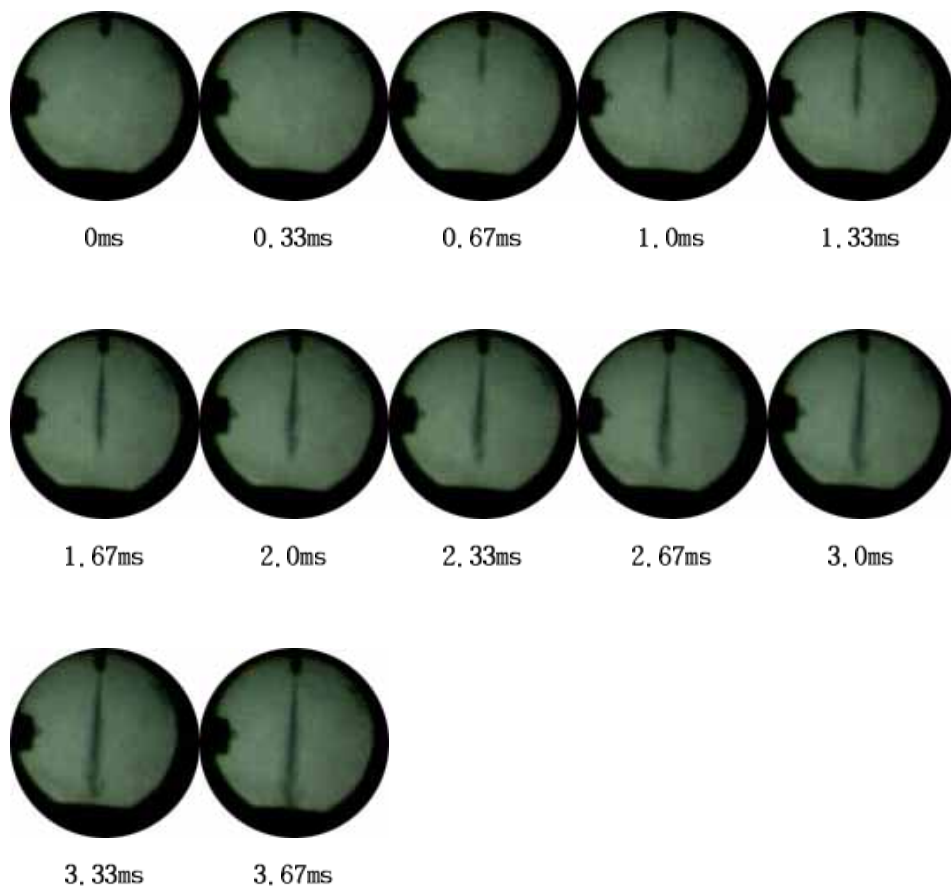


Fig. 4.8 LPG spray development (Rail pressure 10MPa–Trap pressure 1.0MPa)

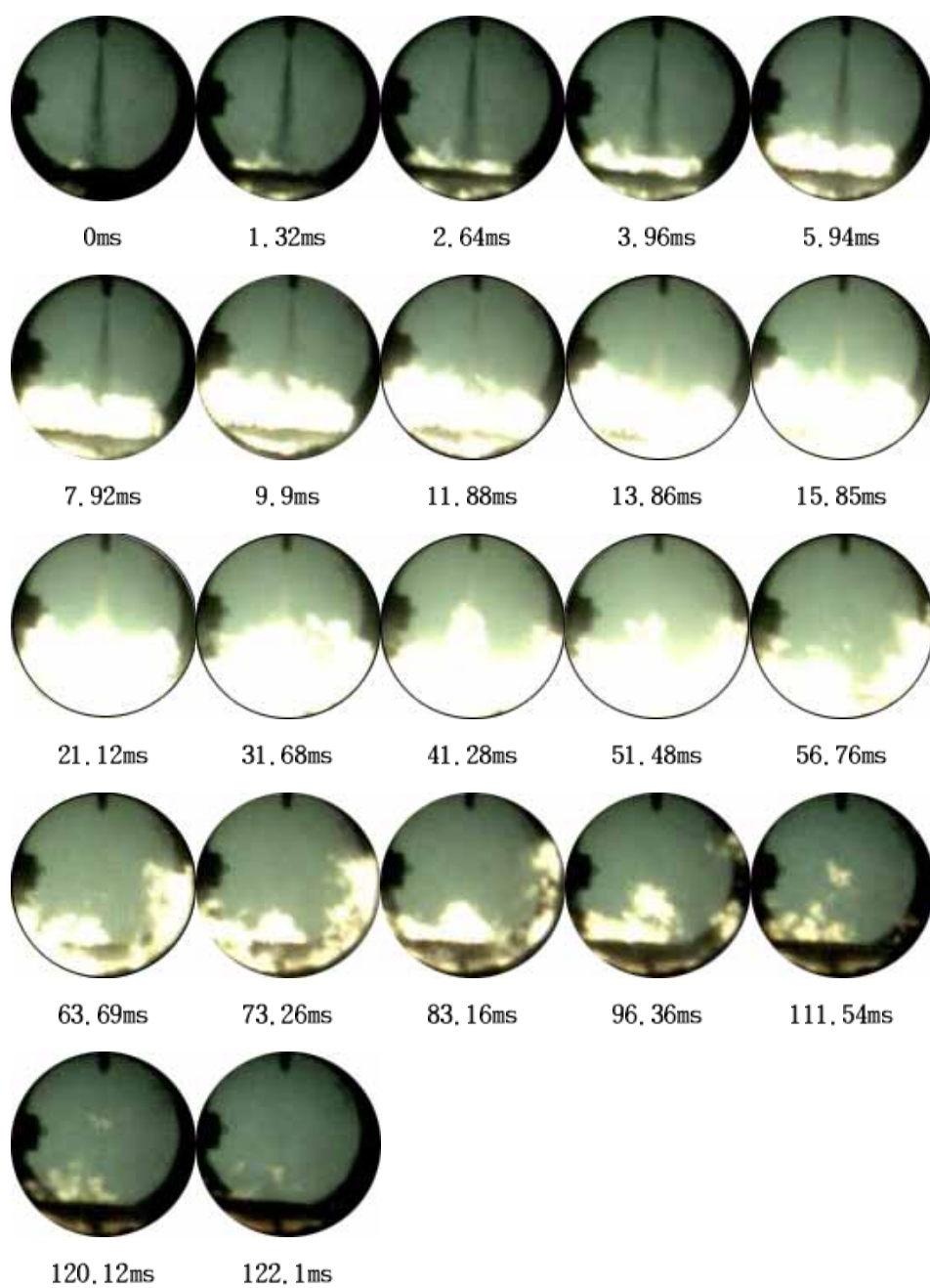


Fig. 4.9 LPG flame development and termination  
(Rail pressure 10MPa–Trap pressure 1.0MPa)

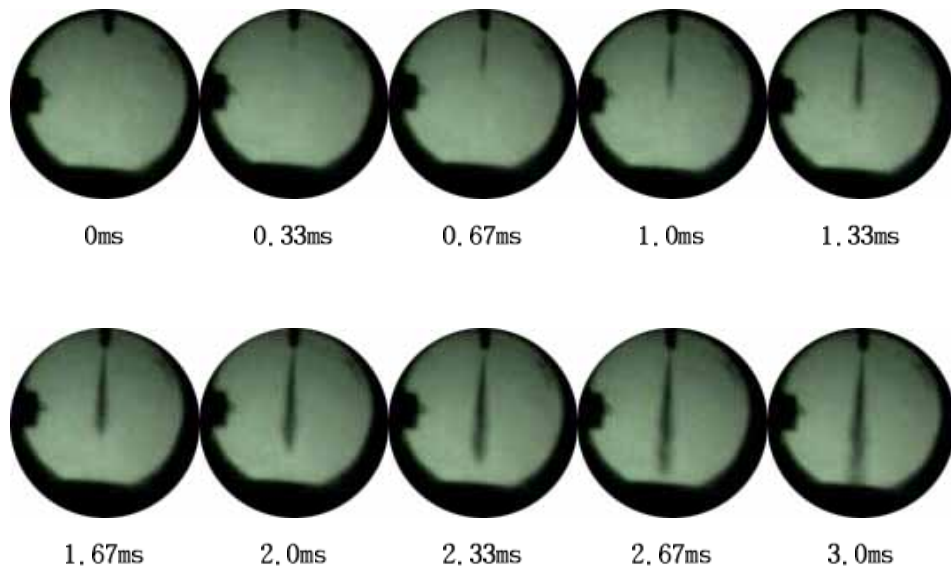


Fig. 4.10 LPG spray development (Rail pressure 15MPa-Trap pressure 1.0MPa)



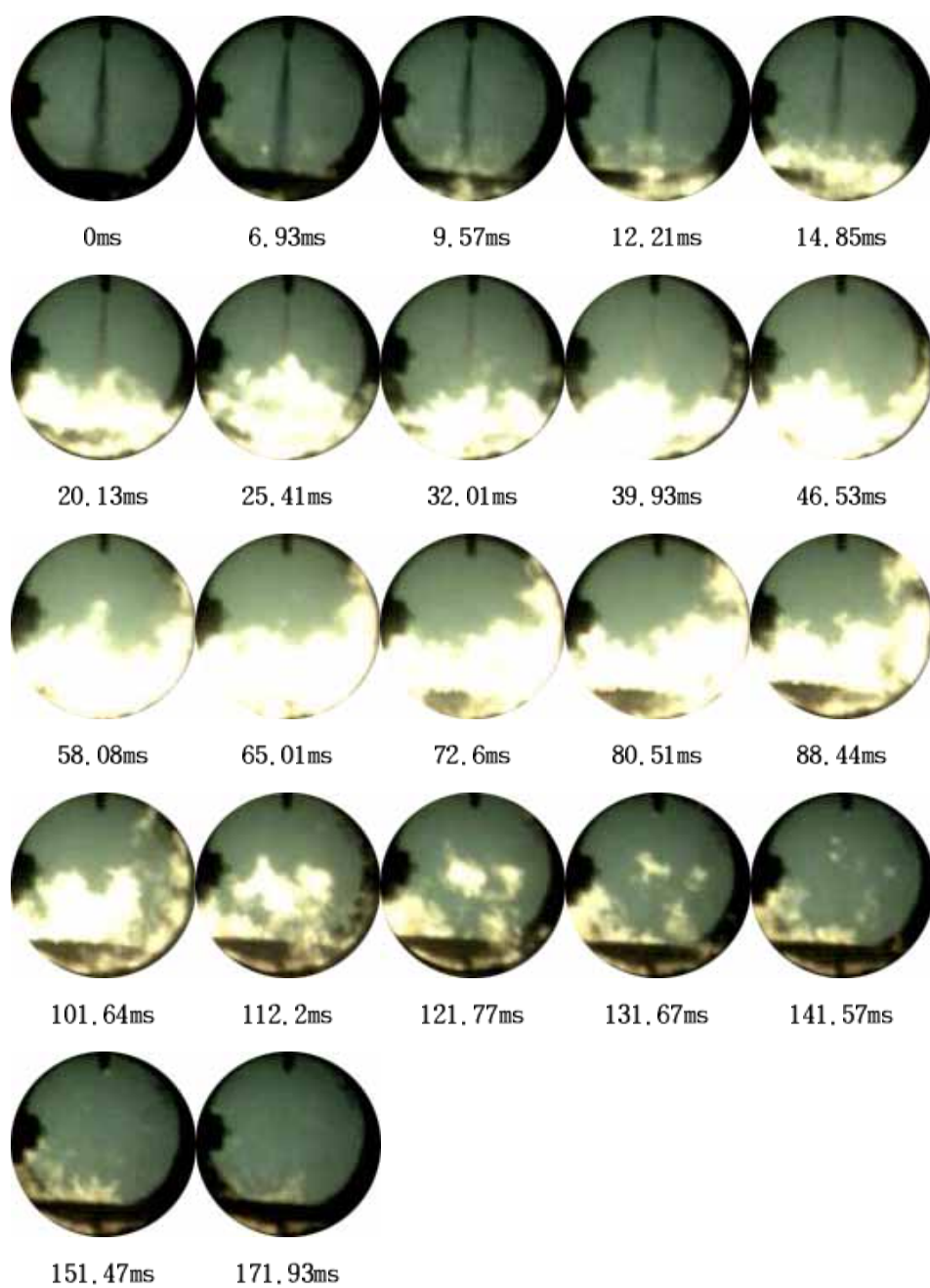


Fig. 4.11 LPG flame development and termination  
(Rail pressure 15MPa-Trap pressure 1.0MPa)

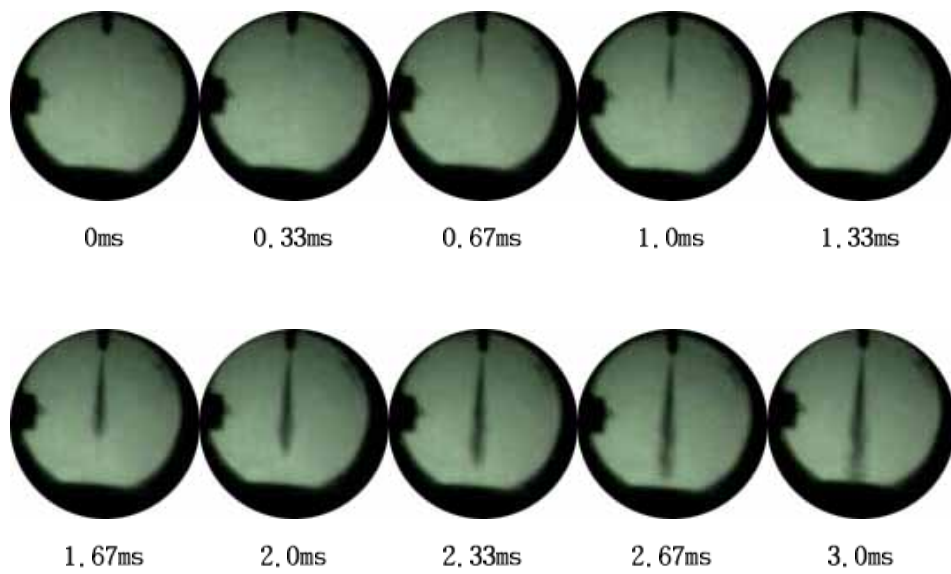


Fig. 4.12 LPG spray development (Rail pressure 25MPa-Trap pressure 1.0MPa)



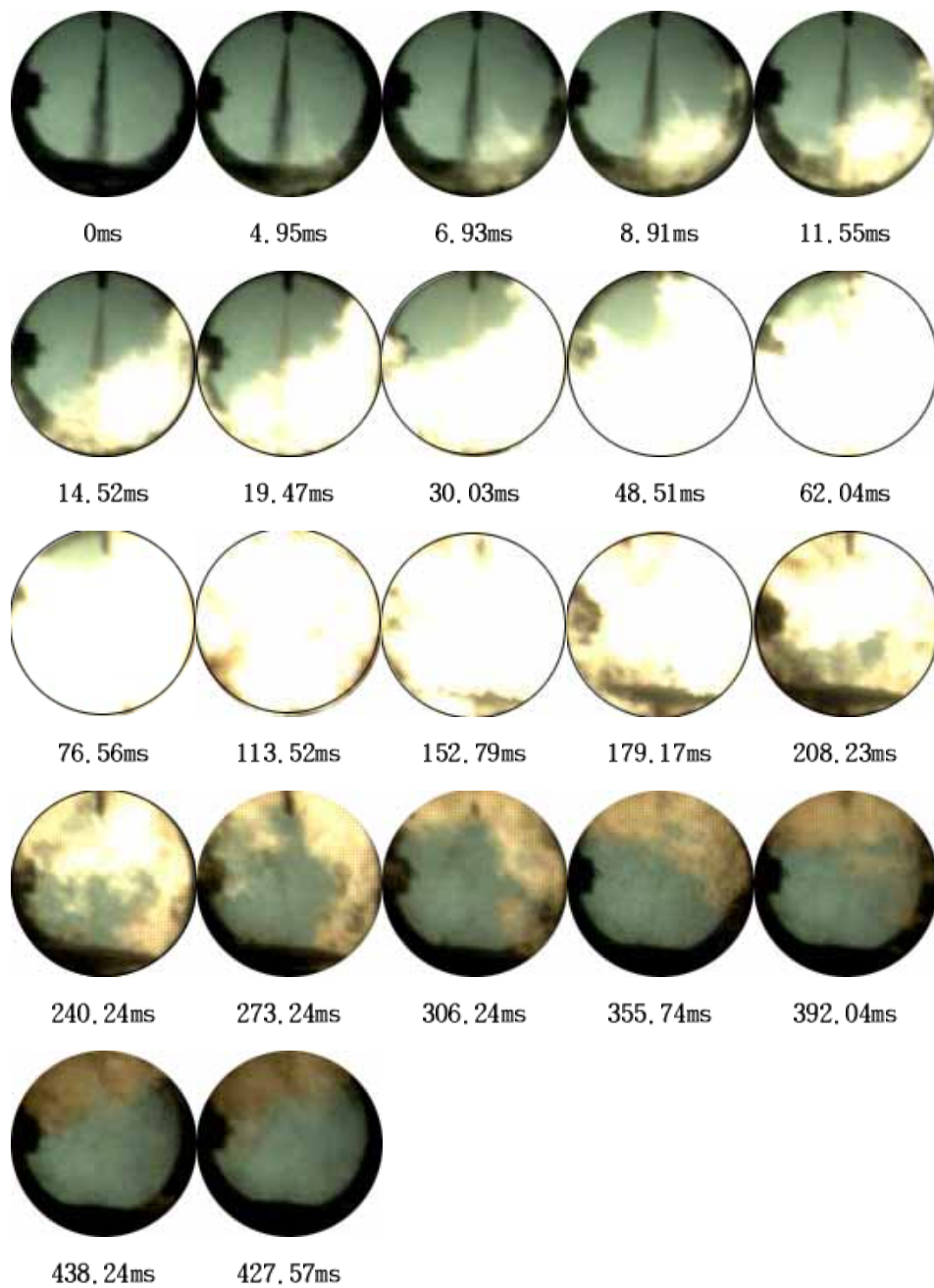


Fig. 4.13 LPG flame development and termination  
(Rail pressure 25MPa-Trap pressure 1.0MPa)

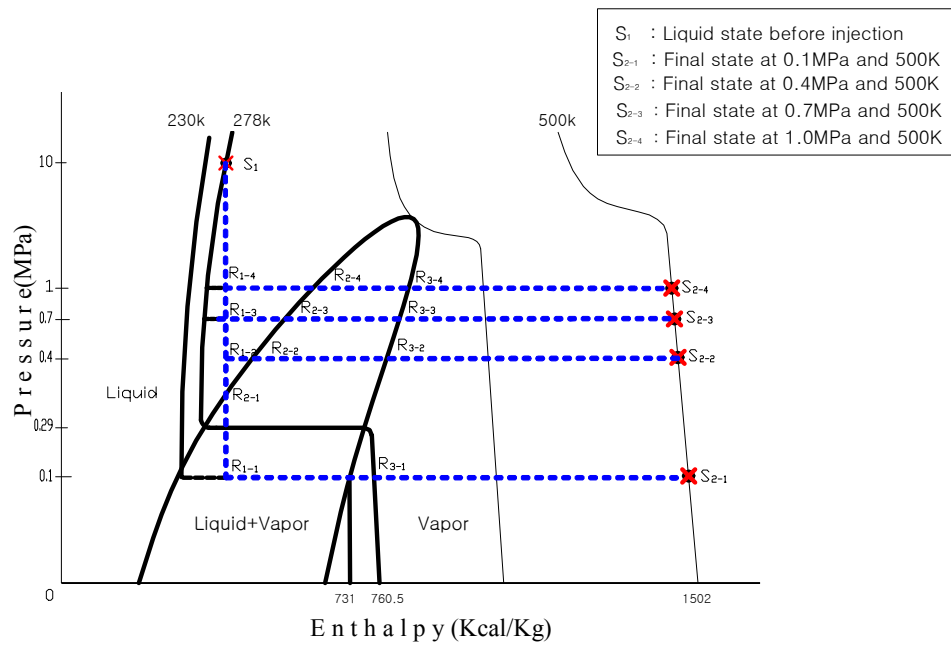


Fig. 4.14 LPG vaporizing routes in Pressure-Enthalpy diagram for LPG used

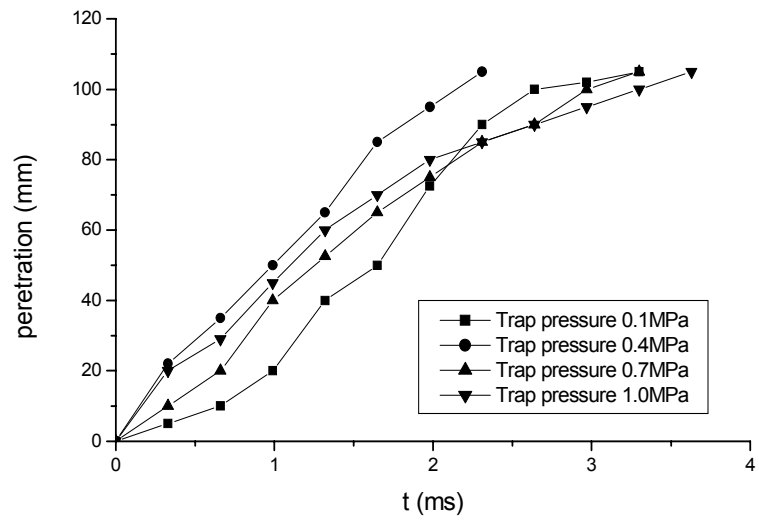


Fig. 4.15 Spray tip penetration at rail pressure of 10MPa

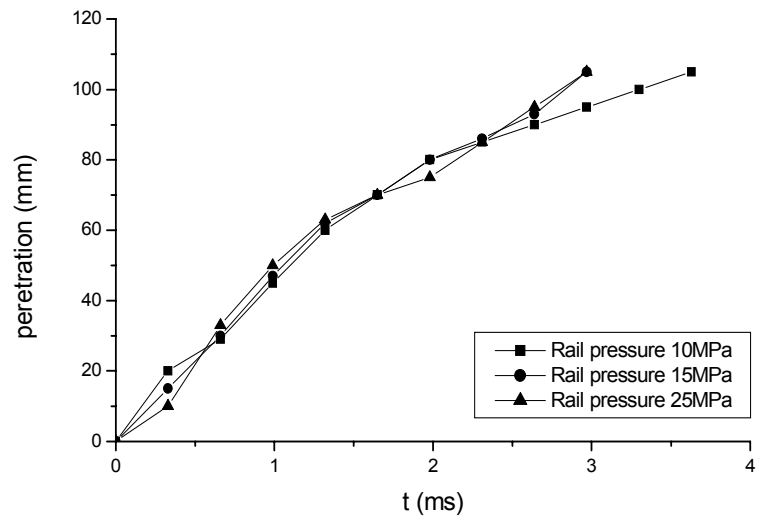


Fig. 4.16 Spray tip penetration at Trap pressure of 1.0MPa

## 4.2 가솔린 분무연소특성

### 4.2.1 분위기 압력 변화의 영향

Figs. 4.17~28은 분사압력 10MPa에서 분위기 압력이 0.1, 0.4, 0.7, 1.0MPa일 때의 분무와 화염사진을 보여준다. 분사압력 10MPa에서 분위기 압력이 0.1MPa의 경우는 주위공기의 저항이 매우 작기 때문에 고압으로 분사된 가솔린 연료는 빠른 속도로 진행하여 충돌면에 도달한다. Fig. 4.29는 분사압력 10MPa에서 0.4~1.0MPa로 분위기 압력이 증가하면 공기저항의 증가로 인해 분무의 진행이 둔화되고 분무밀도가 증가하여 선명한 분무축을 보여준다.

대기압상태의 연소특성을 살펴보면 대기압 상태에서 가솔린이 분사된 경우에는 주위 공기의 저항이 작아 연료가 고속으로 충돌면과 Heating Coil에 충돌하여 작은 액적들로 분열되면서 연소실 내부로 급속하게 튀어올라 확산됨으로써 불규칙적인 분산화염을 보여준다. 분위기 압력이 0.4MPa의 연소특성은 좌측 가열코일부에서 연소가 시작되어 분무축을 따라 화염이 올라감을 보여주는 데 분무충돌에 의하여 액적의 튀어나가는 현상이 줄어들어 연료들이 충돌면 부위에 머물러 있음을 말하며, 또한 분무가 진행되는 동안 분무축 주위로의 연료증발이 많음을 보여준다. 주위공기압력이 더욱 증가하여 0.7, 1.0MPa이 되면 연소가 주로 충돌면 근처에서만 이루어짐을 보여주는데 이는 분무진행동안 연료증발이 줄어들면서 많은 연료가 충돌면 주위에 분포함을 말한다. 또한 고압에 의한 산소농도 증가로 인하여 역시 밝은 자발광을 나타내며 활발한 연소가 진행된다.

연소의 종료과정에서는 분위기압력이 낮은 경우 연소실 전체에서 연소가 완료됨을 나타내는 반면, 압력이 증가하면서 연료가 충돌면 부위에 집중되어 당

량비의 불균형으로 인한 농후한 혼합기를 형성함으로써 산소부족에 의한 미연 가스의 발생이 증가되며 종료 후 가시화창에 soot의 흔적을 나타내고 있다.

## 4.2.2 분사압력변화의 영향

Figs. 4.23~28은 분위기 압력이 1.0MPa, 분위기 온도 500K로 일정한 상태에서 분사압력이 10MPa, 15MPa, 25MPa로 변화 할 때의 분무와 연소를 가시화한 그림이다. 분위기 압력이 1.0MPa인 상태에서 분사압력이 10MPa의 경우는 분무의 충돌면까지의 도달시간이 4.33ms가 걸린 반면 분사압력이 증가하면 도달시간이 15MPa인 경우는 3.67ms, 25MPa의 경우는 3.0ms로써 분무의 충돌면까지의 진행속도가 빨라진다. 또한 분위기 온도가 500K이기 때문에 고온 분위기로 인한 분무의 증발로 인하여 충돌면까지 도달하기까지 분사압력이 낮은 경우는 분무선단부위가 급격하게 둔화됨을 알 수 있다. 분사압력이 1.0MPa의 경우는 충돌면 우측부위에서 시작된 화염이 연소기 내부의 중앙까지 확산된 후 분사되고 있는 연료에 기인하여 화염이 타고 올라간 후 디젤의 확산화염같은 흑갈색의 화염을 나타내며 소멸하고 있다. 압력이 15MPa의 경우는 고압의 분사로 인한 연료가 급속하게 충돌면에서의 빠른 확산으로 화염이 연소실 내부를 강렬한 자발광으로 채운 후 시간의 경과에 따른 산소의 부족으로 인하여 많은 Soot를 발생하며 소멸한다.

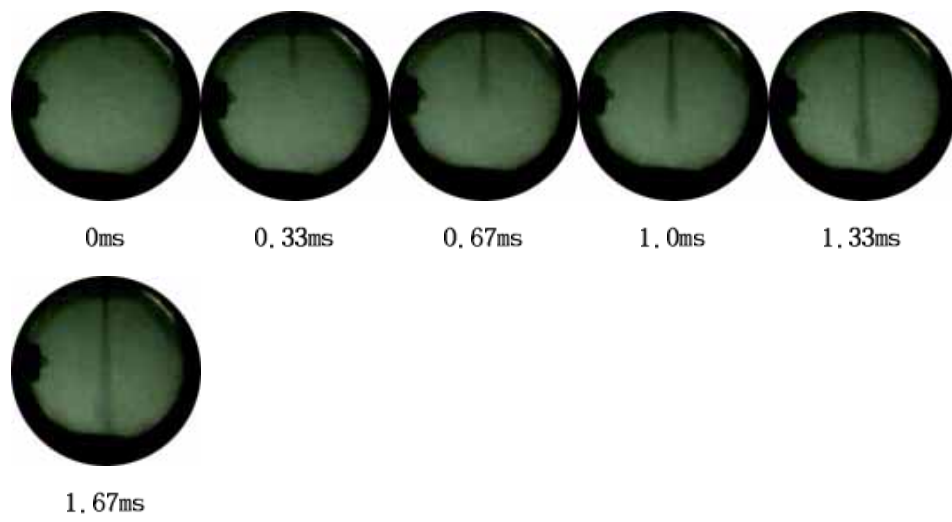


Fig. 4.17 Gasoline Spray development  
(Rail pressure 10MPa–Trap pressure 0.1MPa)

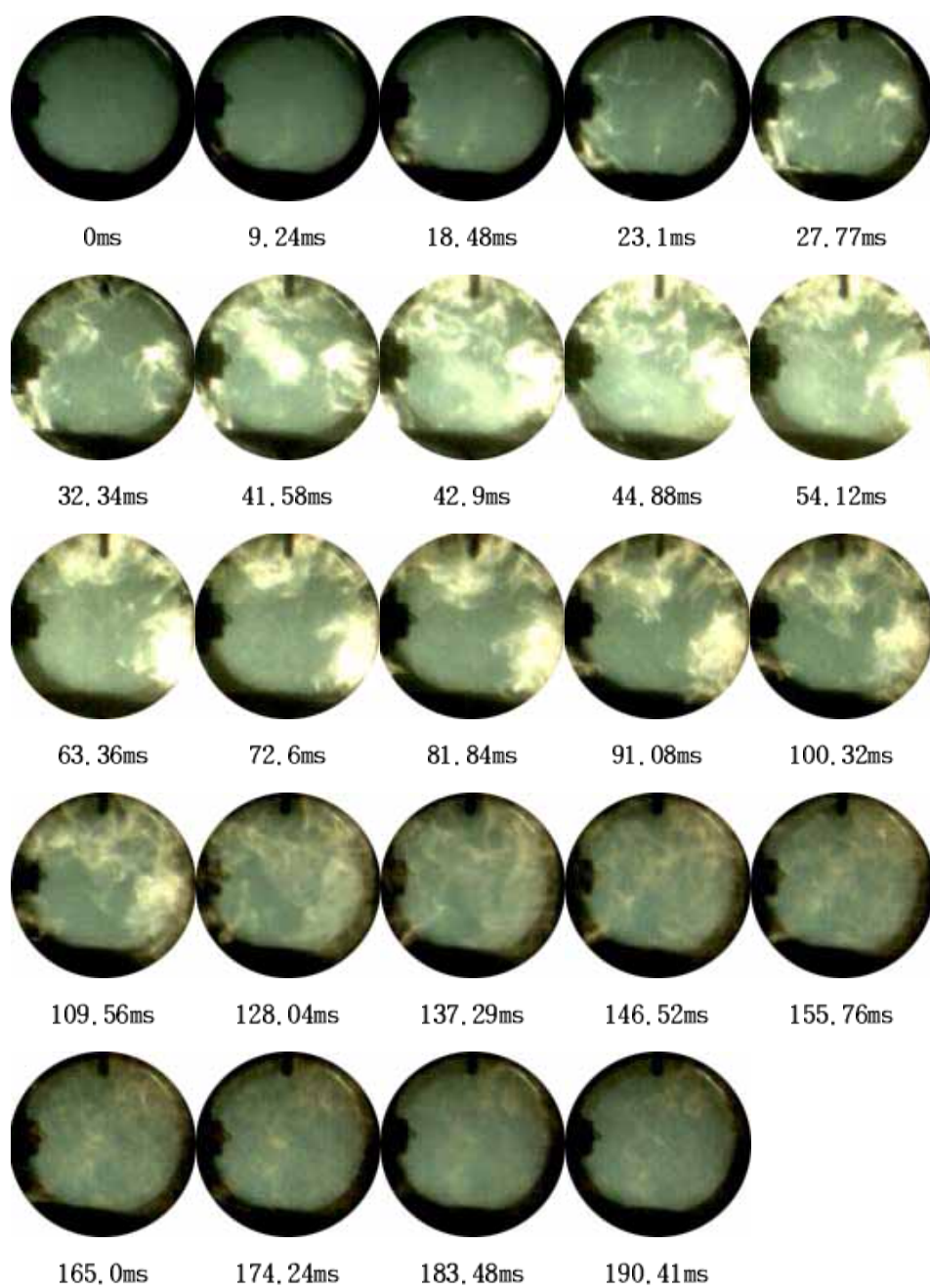


Fig. 4.18 Gasoline flame development and termination  
(Rail pressure 10MPa–Trap pressure 0.1MPa)



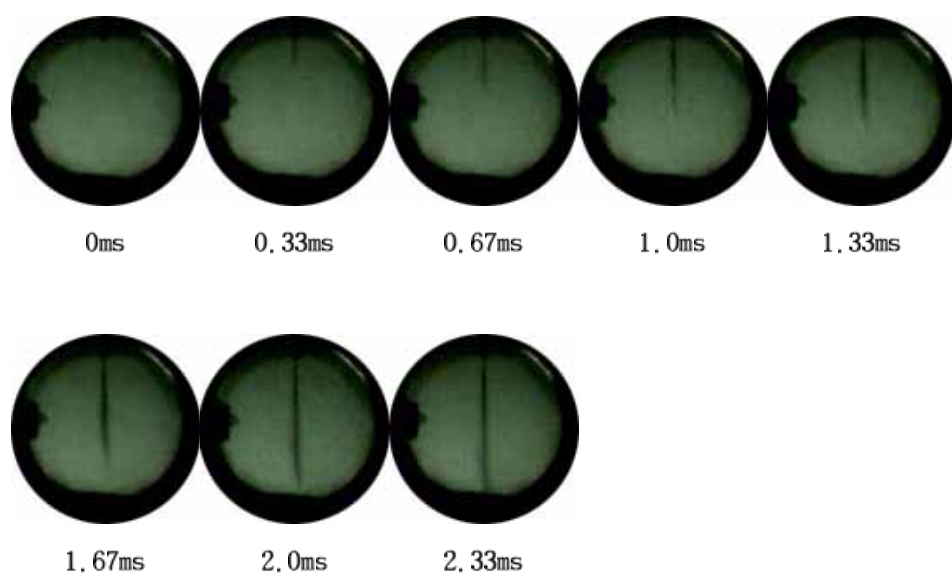


Fig. 4.19 Gasoline Spray development  
(Rail pressure 10MPa–Trap pressure 0.4MPa)

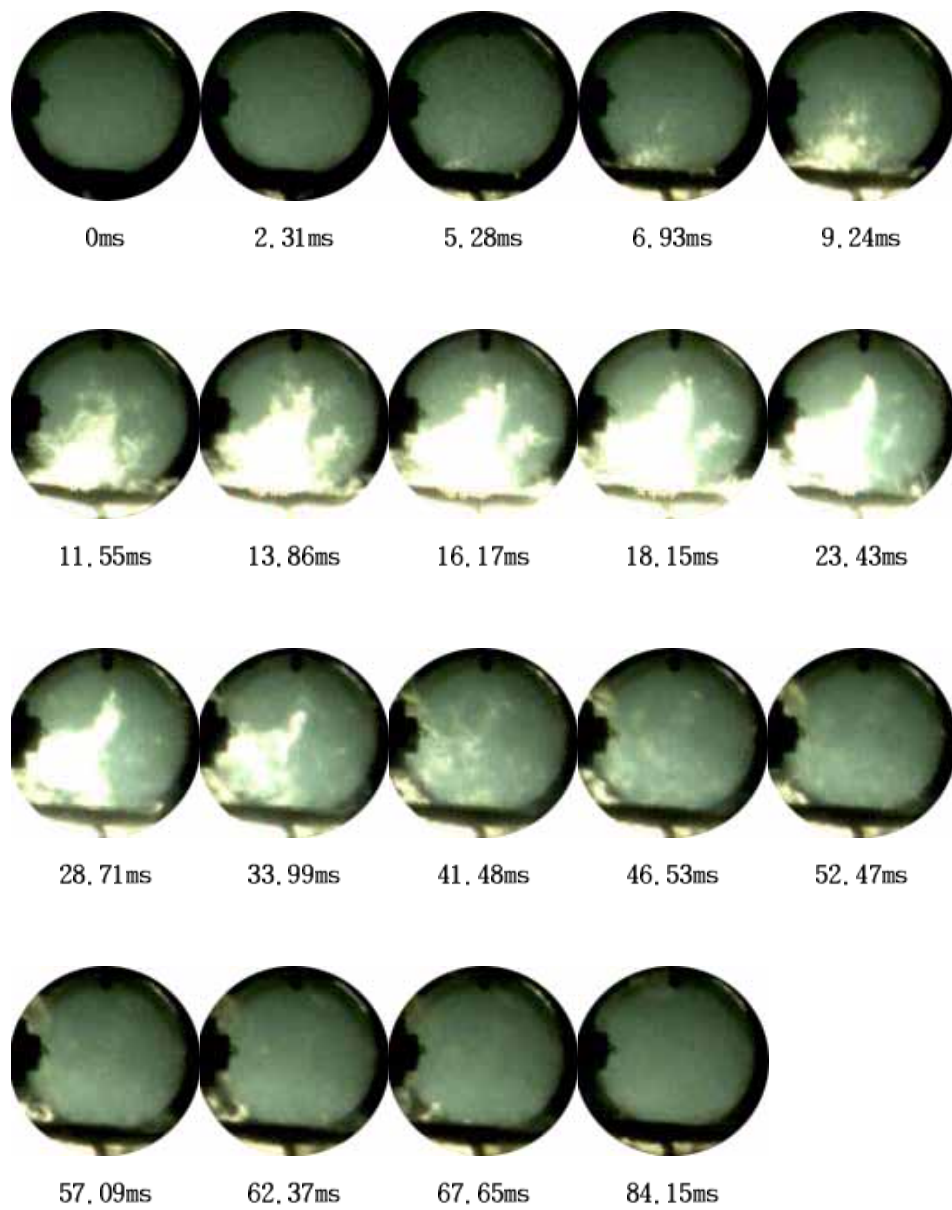


Fig. 4.20 Gasoline flame development and termination  
(Rail pressure 10MPa–Trap pressure 0.4MPa)

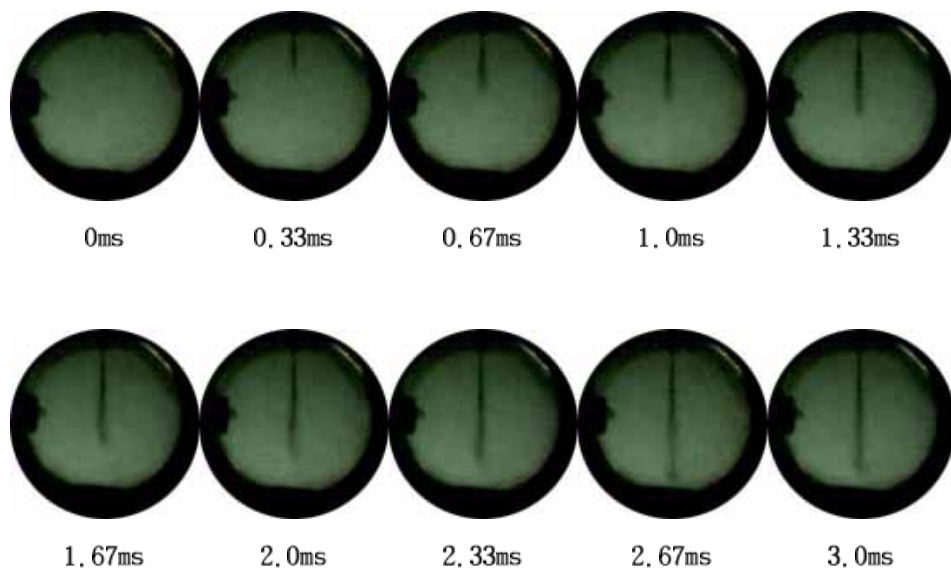


Fig. 4.21 Gasoline Spray development  
(Rail pressure 10MPa–Trap pressure 0.7MPa)

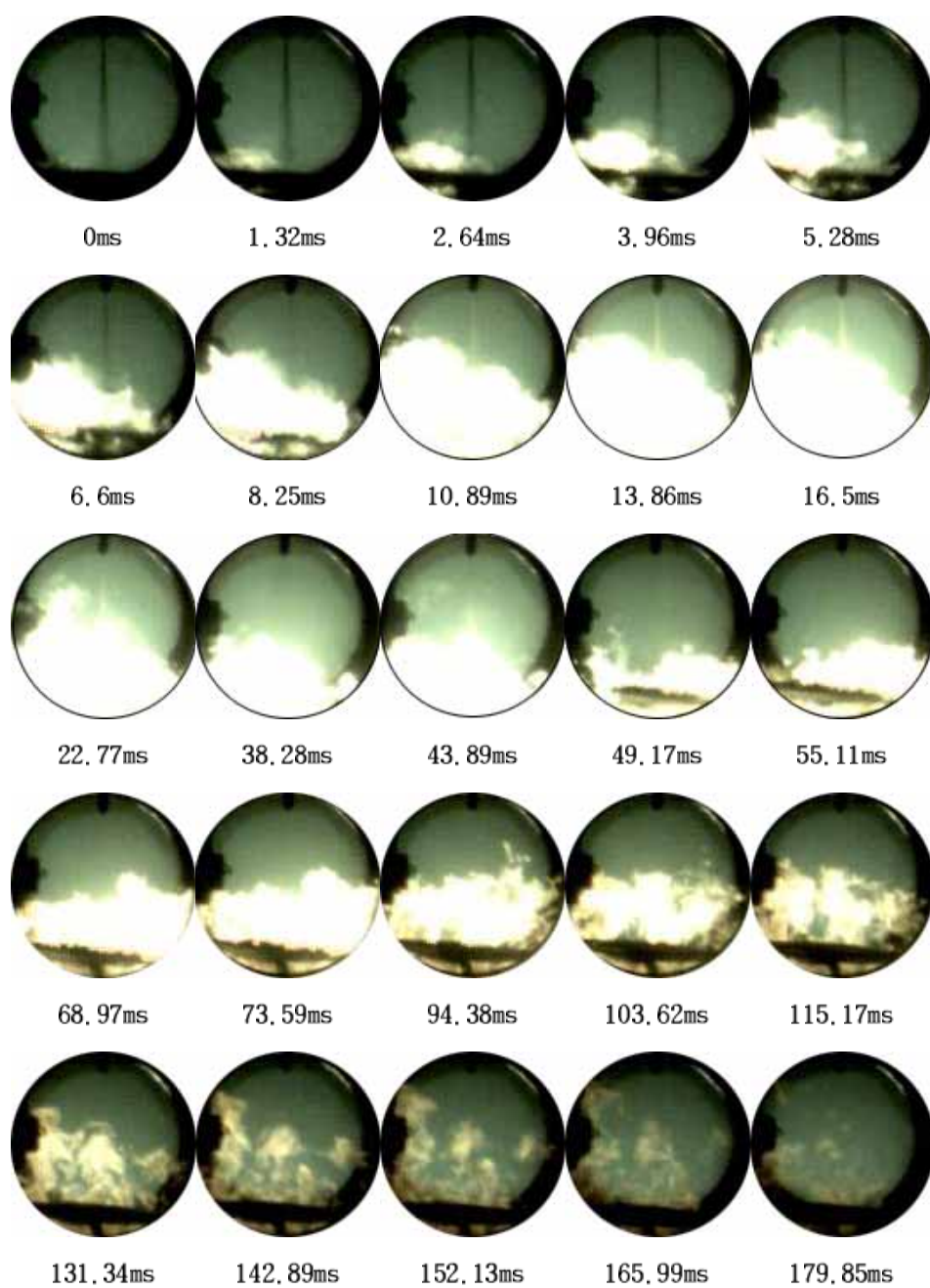


Fig. 4.22 Gasoline flame development and termination  
(Rail pressure 10MPa–Trap pressure 0.7MPa)

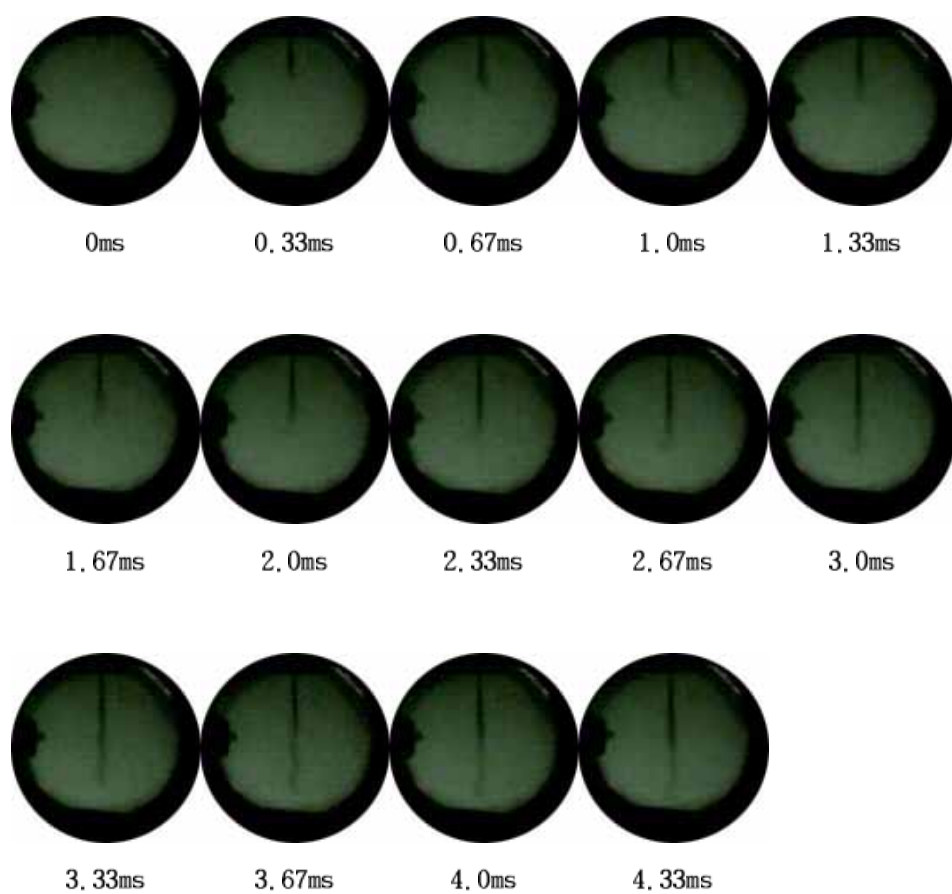


Fig. 4.23 Gasoline spray development  
(Rail pressure 10MPa-Trap pressure 1.0MPa)

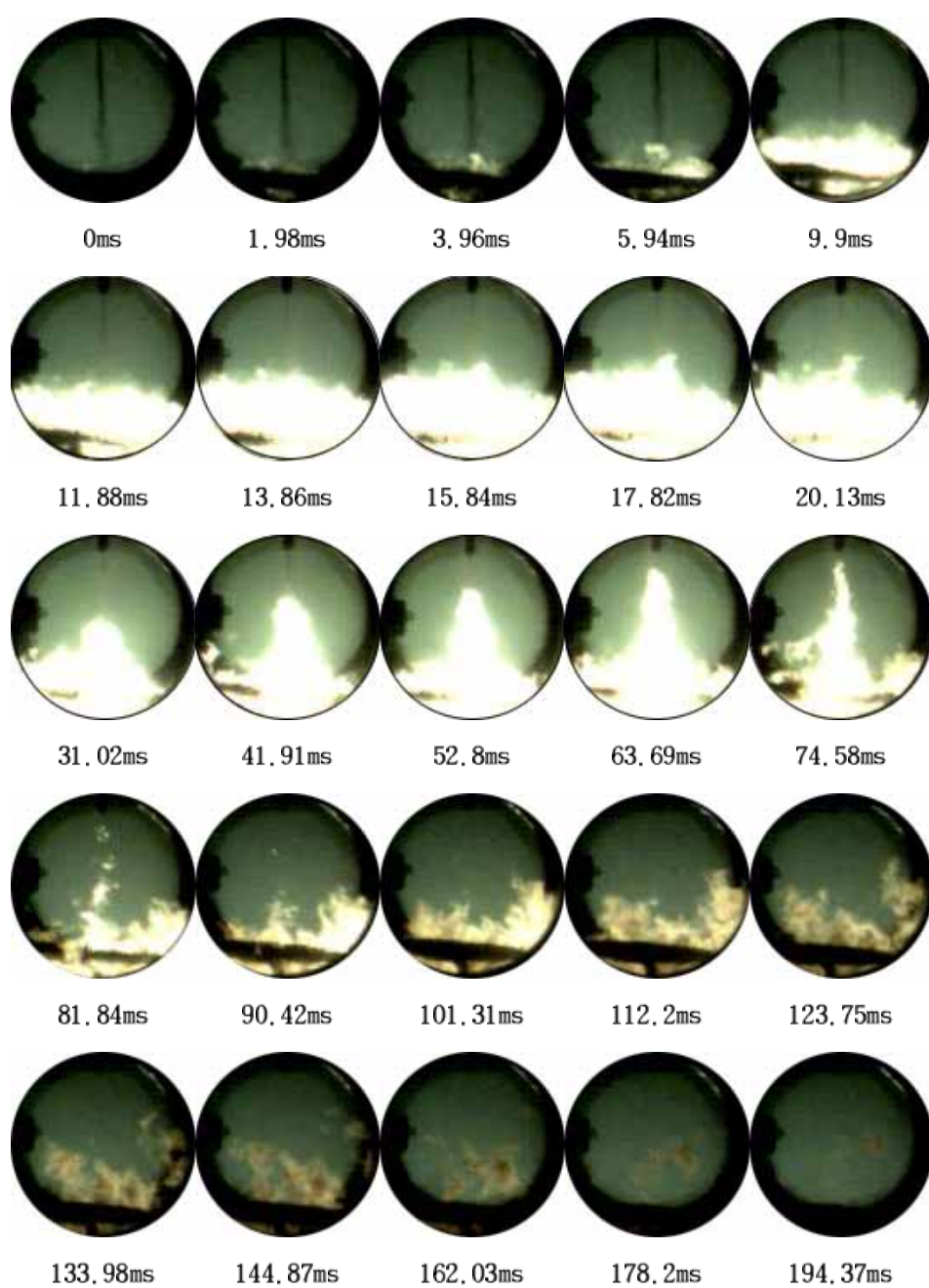


Fig. 4.24 Gasoline flame development and termination  
(Rail pressure 10MPa–Trap pressure 1.0MPa)

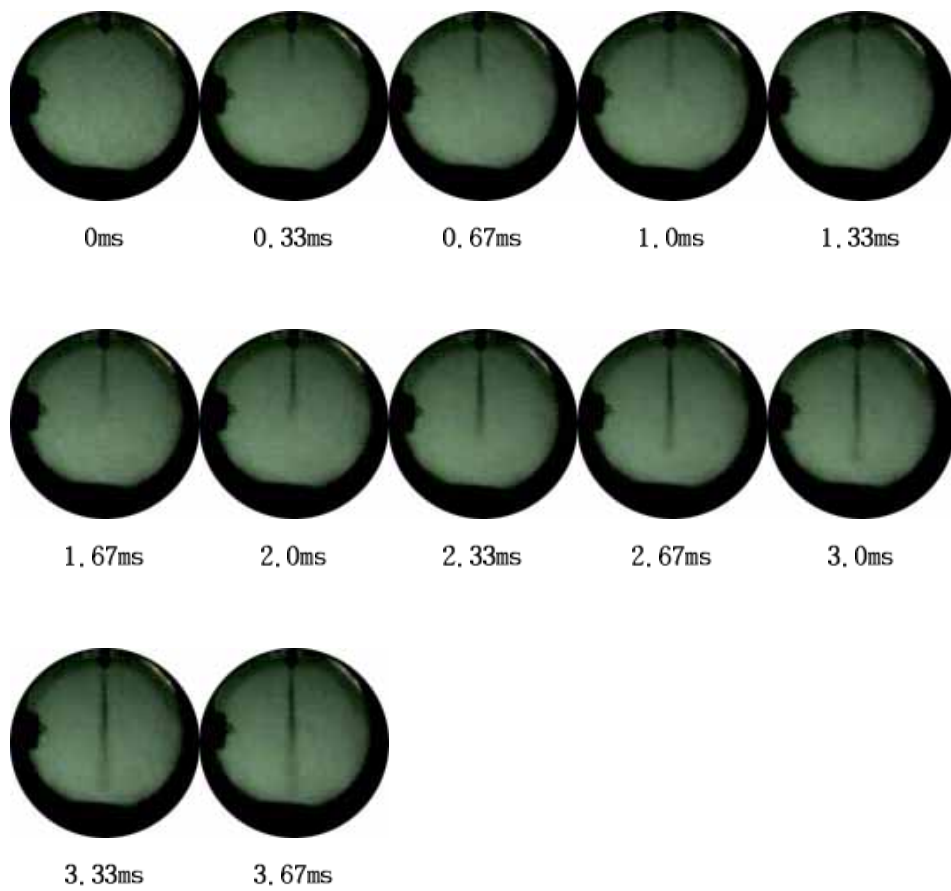


Fig. 4.25 Gasoline spray development  
(Rail pressure 15MPa-Trap pressure 1.0MPa)



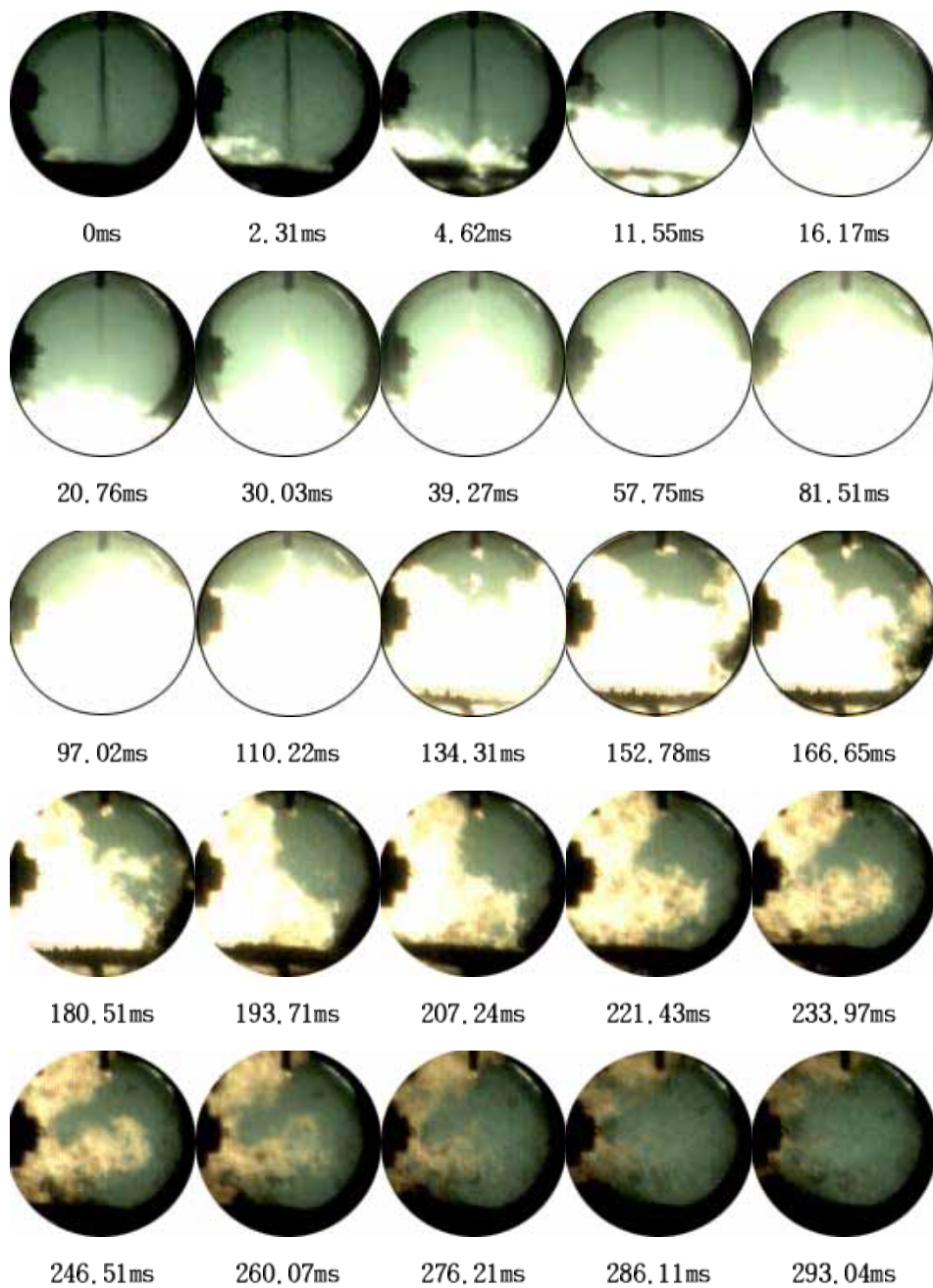


Fig. 4.26 Gasoline flame development and termination  
(Rail pressure 15MPa-Trap pressure 1.0MPa)



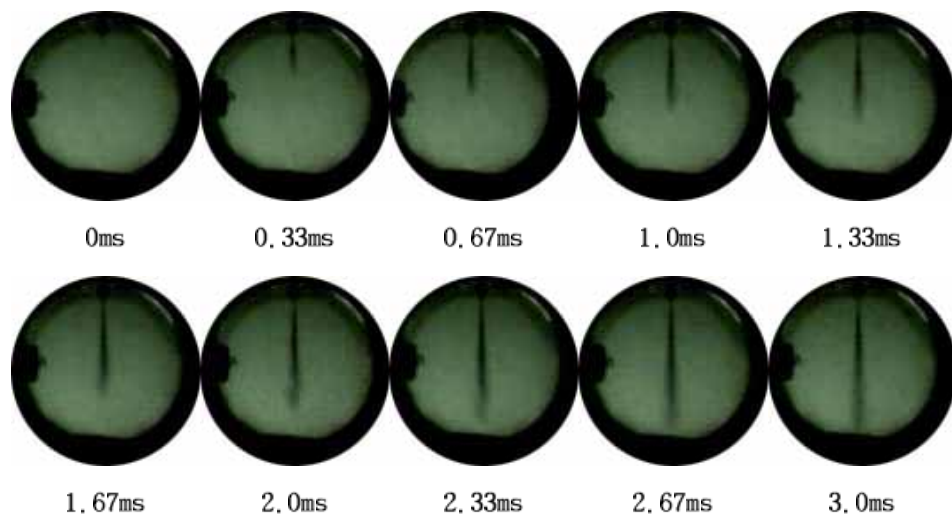


Fig. 4.27 Gasoline spray development  
(Rail pressure 25MPa-Trap pressure 1.0MPa)

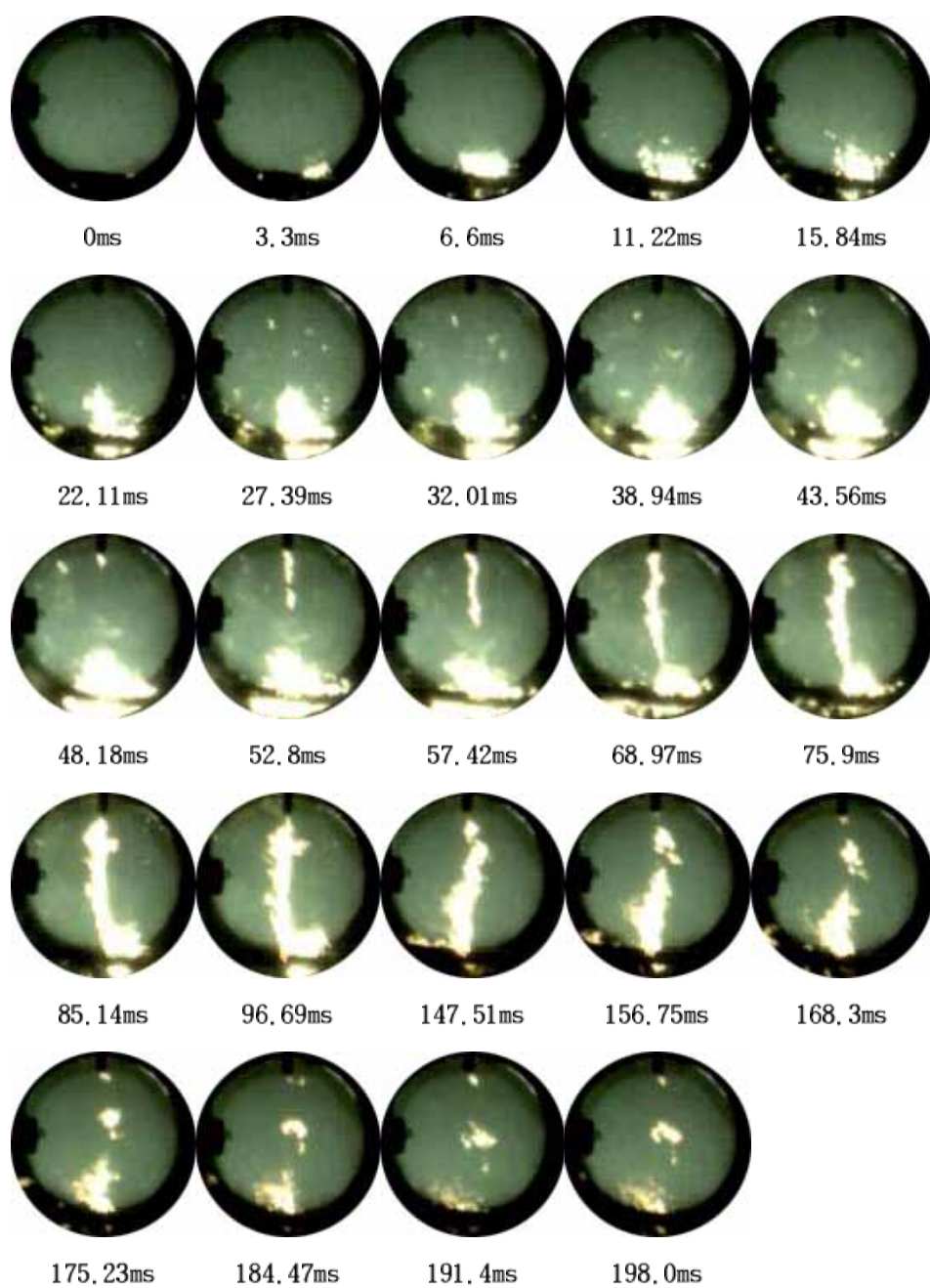


Fig. 4.28 Gasoline flame development and termination  
(Rail pressure 25MPa-Trap pressure 1.0MPa)

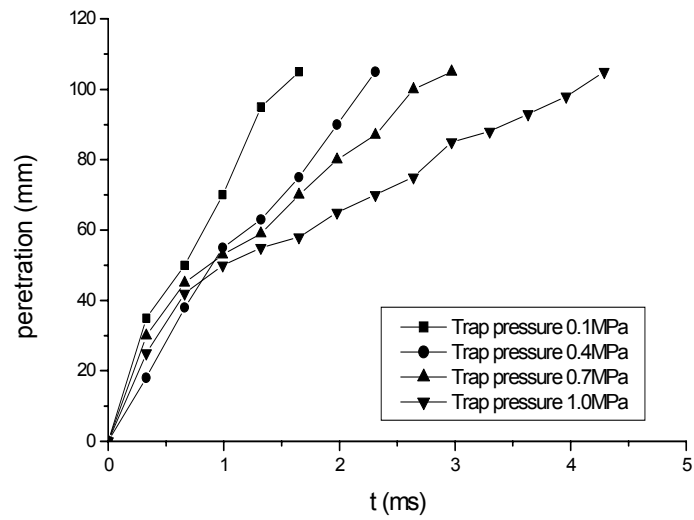


Fig. 4.29 Spray tip penetration at rail pressure of 10MPa

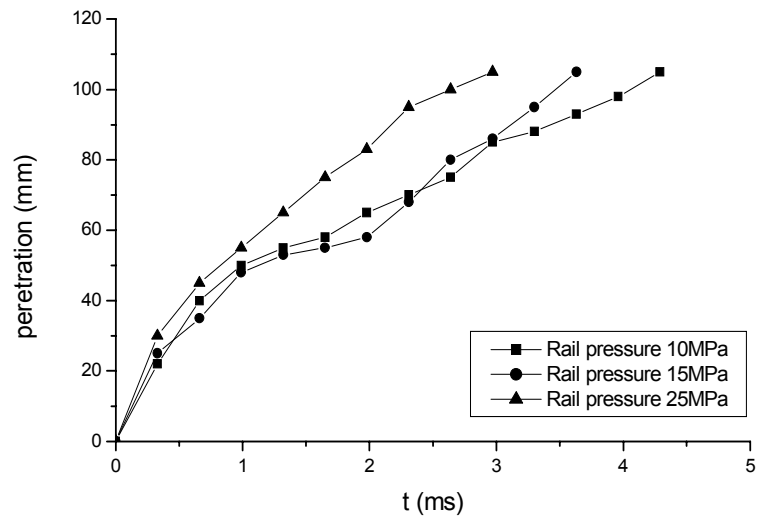


Fig. 4.30 Spray tip penetration at Trap pressure of 1.0MPa

## 4.3 디젤분무연소특성

### 4.3.1 분위기 압력변화의 영향

Figs. 4.31~38은 분사압력 10MPa인 분무거동을 분위기 압력 0.1, 0.4, 0.7, 1.0MPa에서 가시화한 결과이다. 분사압력 10MPa의 경우 분위기 압력을 변화시키면서 관찰하면 대기압 상태에서 분사한 Fig. 4.31의 경우 주변 공기의 저항이 미미하기 때문에 분사연료가 급속하게 연소실 아래의 충돌면에 이르는 것을 볼 수 있다. 하지만 분위기 압력이 증가한 0.4, 0.7MPa의 경우 분무거동이 느려지고 1.0MPa인 경우에는 분무선단의 버섯모양과 분무의 굴곡을 나타낸다(Fig. 4.49).

Fig. 4.32는 500K 대기압 분위기에서 10MPa의 고압으로 분사된 연료가 분사된 경우의 연소특성을 보여준다. 고압으로 분사된 연료가 고온저압의 분위기에서 신속하게 증발되고 동시에 고속으로 충돌면에 충돌된 액적들이 연소실 내에 넓게 분포됨으로써 착화점이 명확하지 않으며 연소실 전체에서 거의 동시에 연소가 시작되고 화염이 연소실을 가득 채운다. 하지만 전체적으로 확산 화염과 같은 밝은 부분을 갖지 못하고 연소를 마친다. 모든 영역에서 연소가 활발하지 못하고 많은 미연가스를 동반하면서 soot가 전 가시화창을 오염시킨다. 분위기 압력이 0.4MPa이 되면 이러한 특성이 줄어들면서 화염이 주로 충돌부위에 집중된다. 하지만 아직 많은 연소들이 연소실 상단에서 진행된다. 압력이 더욱 증가되면 분무연료의 증발이 감소되고 충돌부위 근처에 연료가 집중됨으로서 밝은 연소화염이 이곳을 중심으로 발달되고 소멸된다.

### 4.3.2 분사압력변화의 영향

Figs. 4.37~48은 동일한 분위기 조건인 500K, 1.0MPa에서 분사압력이 10, 15, 25, 50, 100, 150MPa일경우의 분무와 연소사진이다.

분무거동은 Fig. 4.50에서 보여주는 것처럼 분사압력의 증가와 함께 증가된다. 압력에 따라 분무형상이 크게 바뀌는데 압력이 증가하면서 분무선단이 버섯모양을 분명히 하고 넓게 퍼진다. 화염에 대해서는 앞절에서 설명한 것처럼 분사압력 10MPa에서는 연소가 시작된 후 화염이 충돌면 근처에 집중되어 진행됨을 보여주지만, 압력이 증가하면서 화염분포가 연소실 중앙으로 확산되고 50MPa이상이 되면 연소실 전체에 매우 밝은 자발광을 발하면서 연소된다. 화염의 종료 시점을 보면 압력이 증가하면서 미연소 가스의 증가와 soot에 의한 가시화창의 오염이 심화된다. 특히 50MPa이상에서는 광원에 의한 빛이 투과될 수 없을 정도로 가시화창의 오염이 심하다.

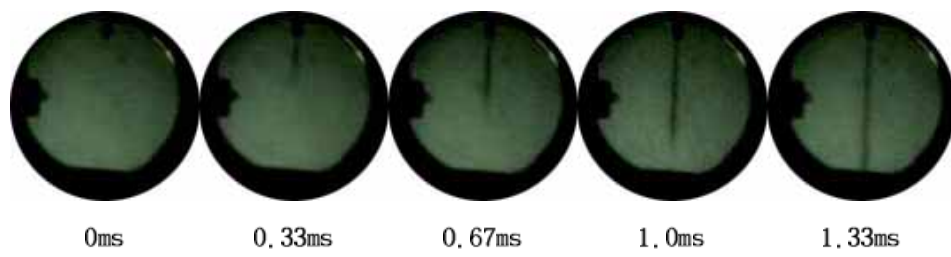


Fig. 4.31 Diesel spray development  
(Rail pressure 10MPa–Trap pressure 0.1MPa)

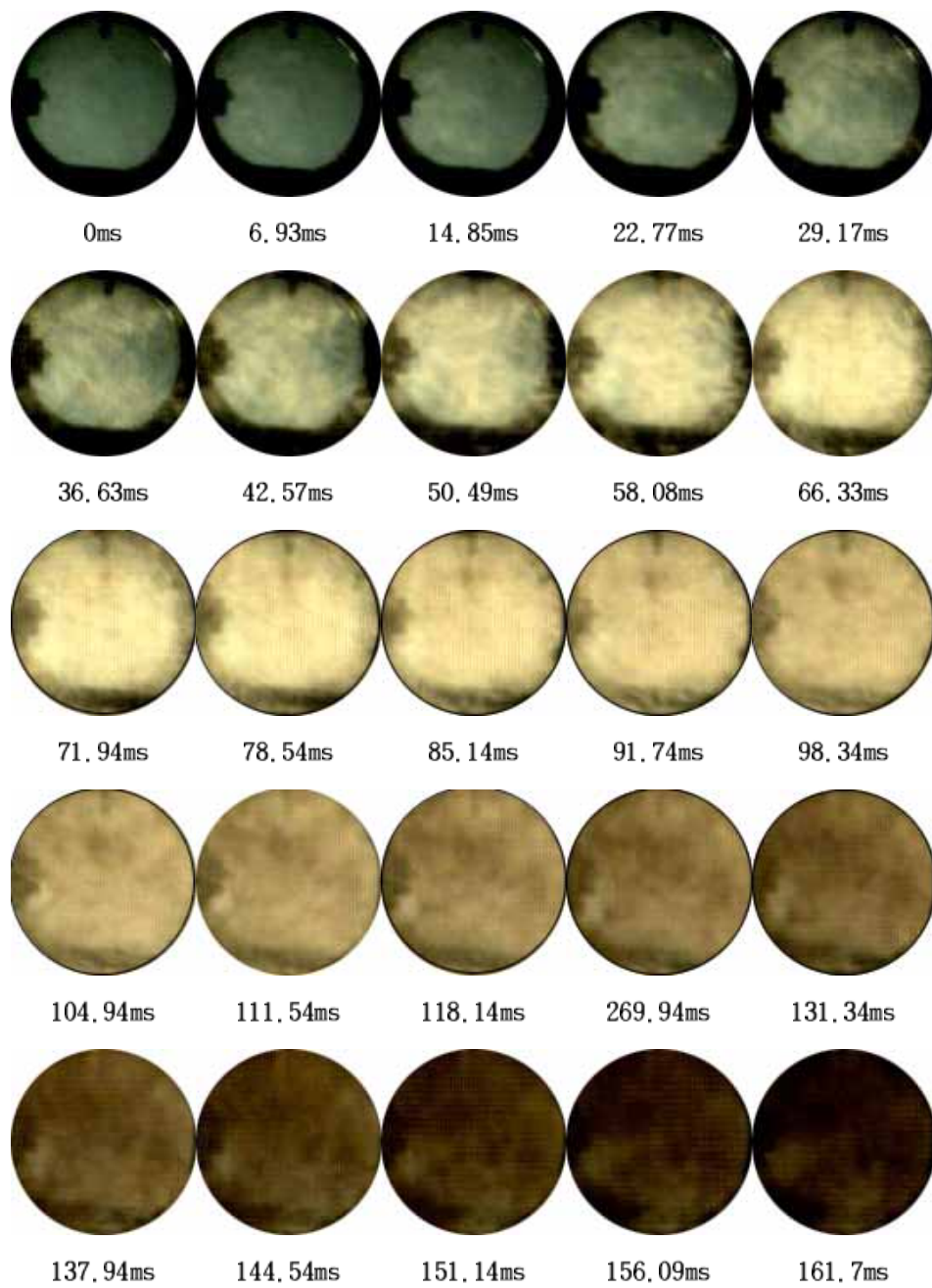


Fig. 4.32 Diesel flame development and termination  
(Rail pressure 10MPa–Trap pressure 0.1MPa)

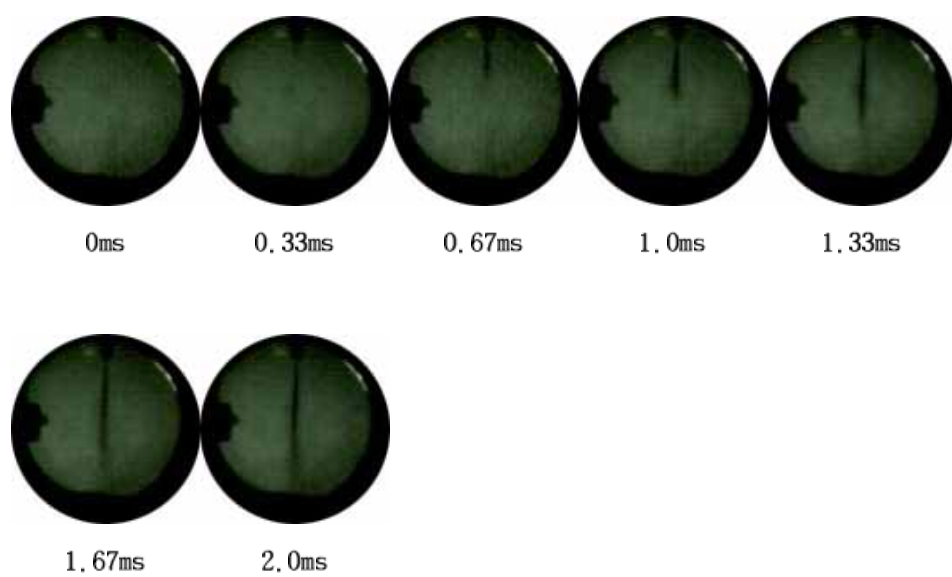


Fig. 4.33 Diesel spray development  
(Rail pressure 10MPa–Trap pressure 0.4MPa)



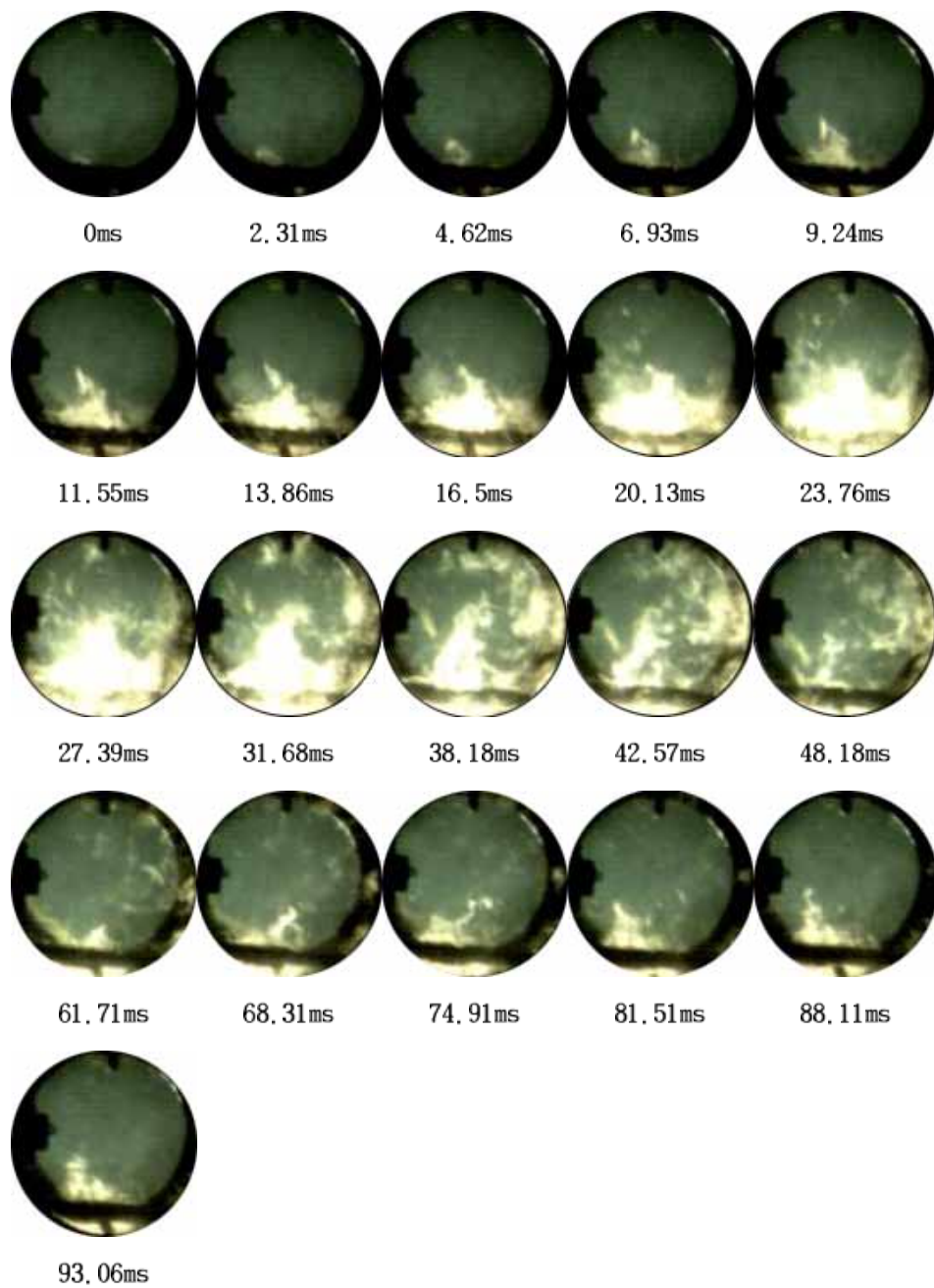


Fig. 4.34 Diesel flame development and termination  
(Rail pressure 10MPa-Trap pressure 0.4MPa)

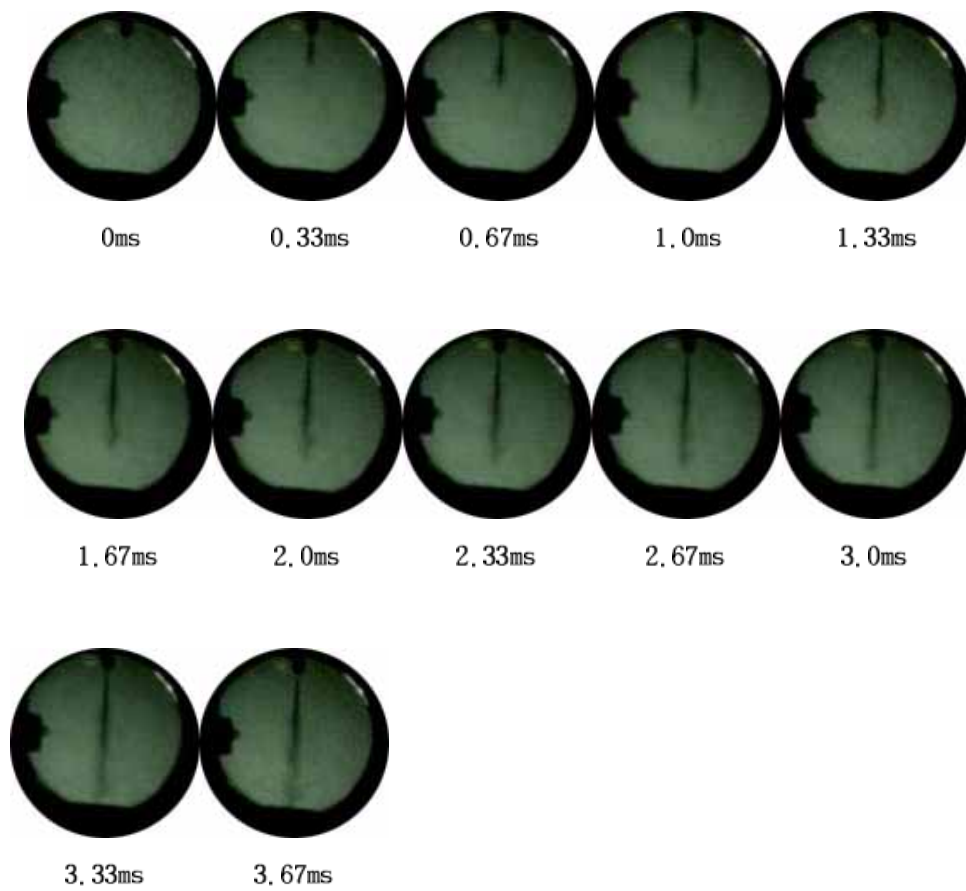


Fig. 4.35 Diesel spray development  
(Rail pressure 10MPa-Trap pressure 0.7MPa)

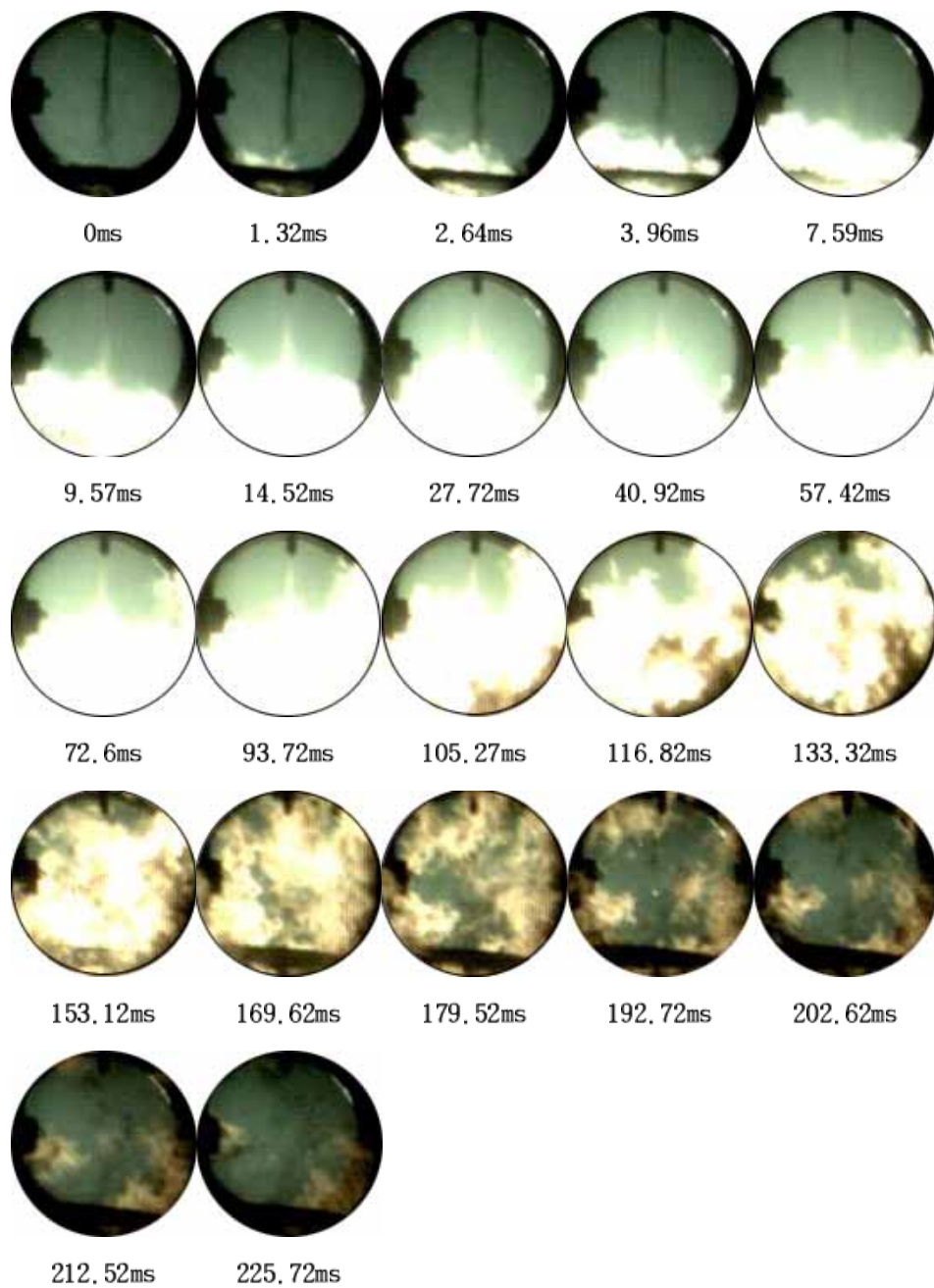


Fig. 4.36 Diesel flame development and termination  
(Rail pressure 10MPa–Trap pressure 0.7MPa)

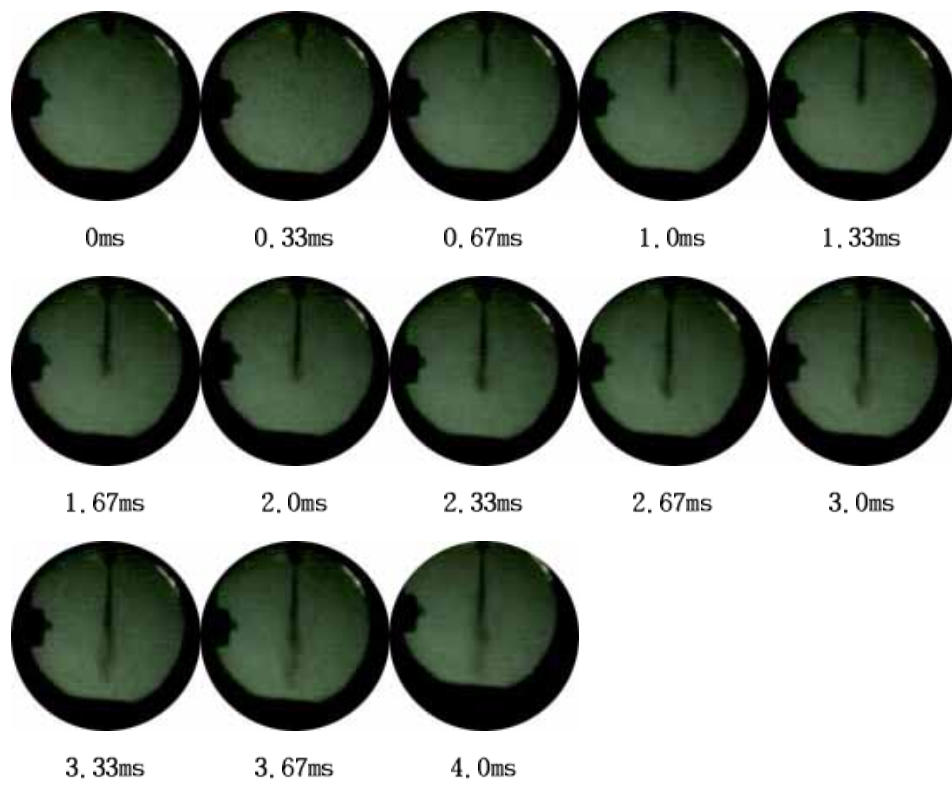


Fig. 4.37 Diesel spray development  
(Rail pressure 10MPa–Trap pressure 1.0MPa)

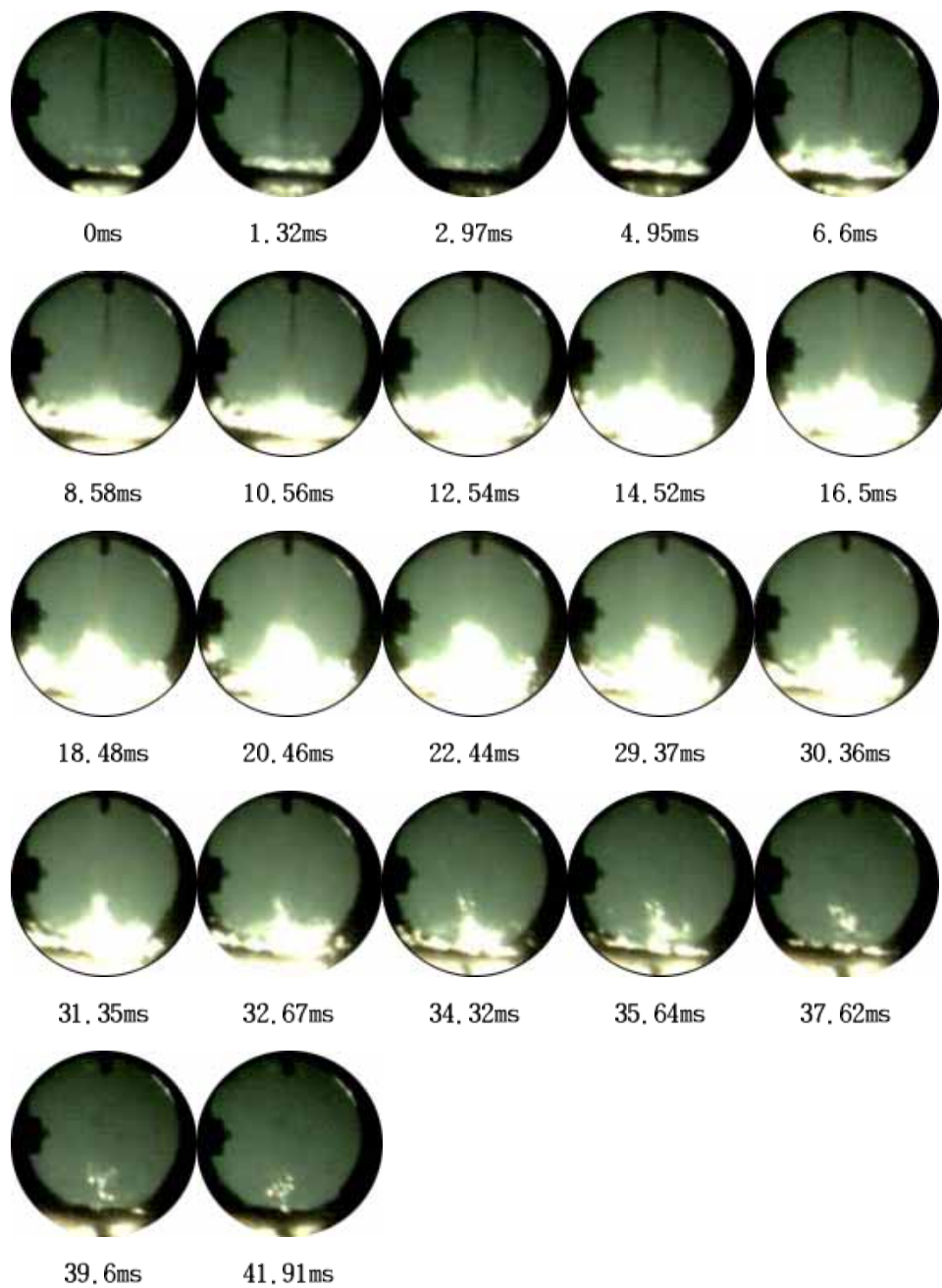


Fig. 4.38 Diesel flame development and termination  
(Rail pressure 10MPa–Trap pressure 1.0MPa)

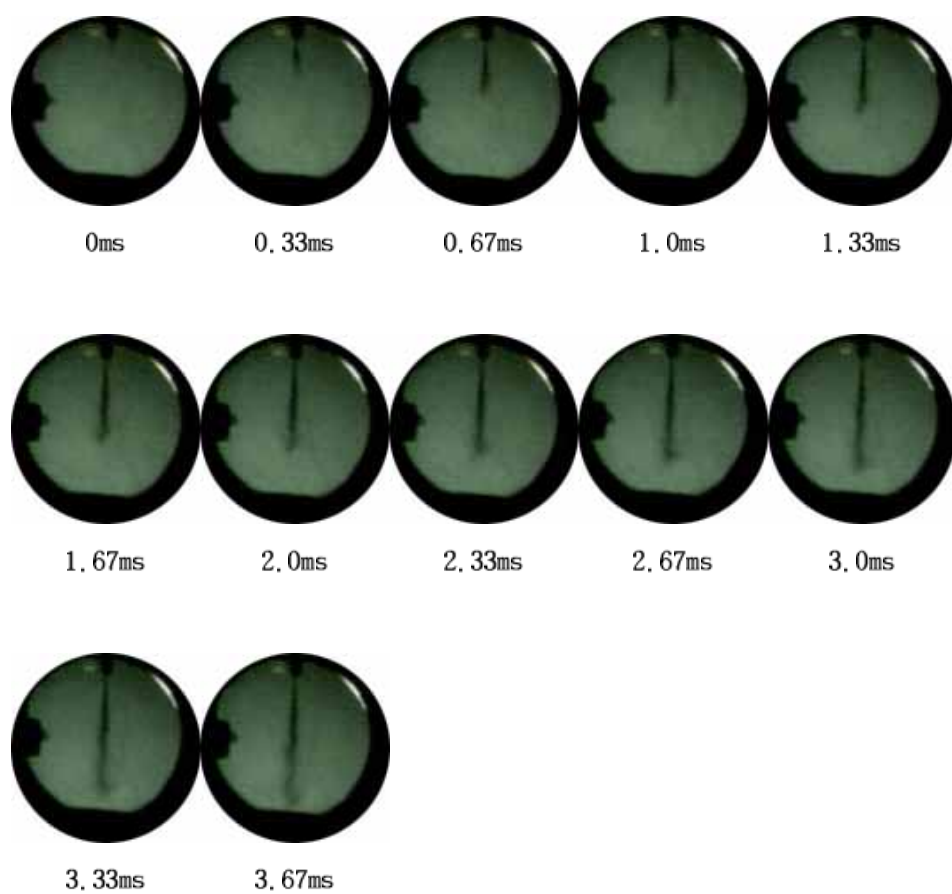


Fig. 4.39 Diesel spray development  
(Rail pressure 15MPa-Trap pressure 1.0MPa)



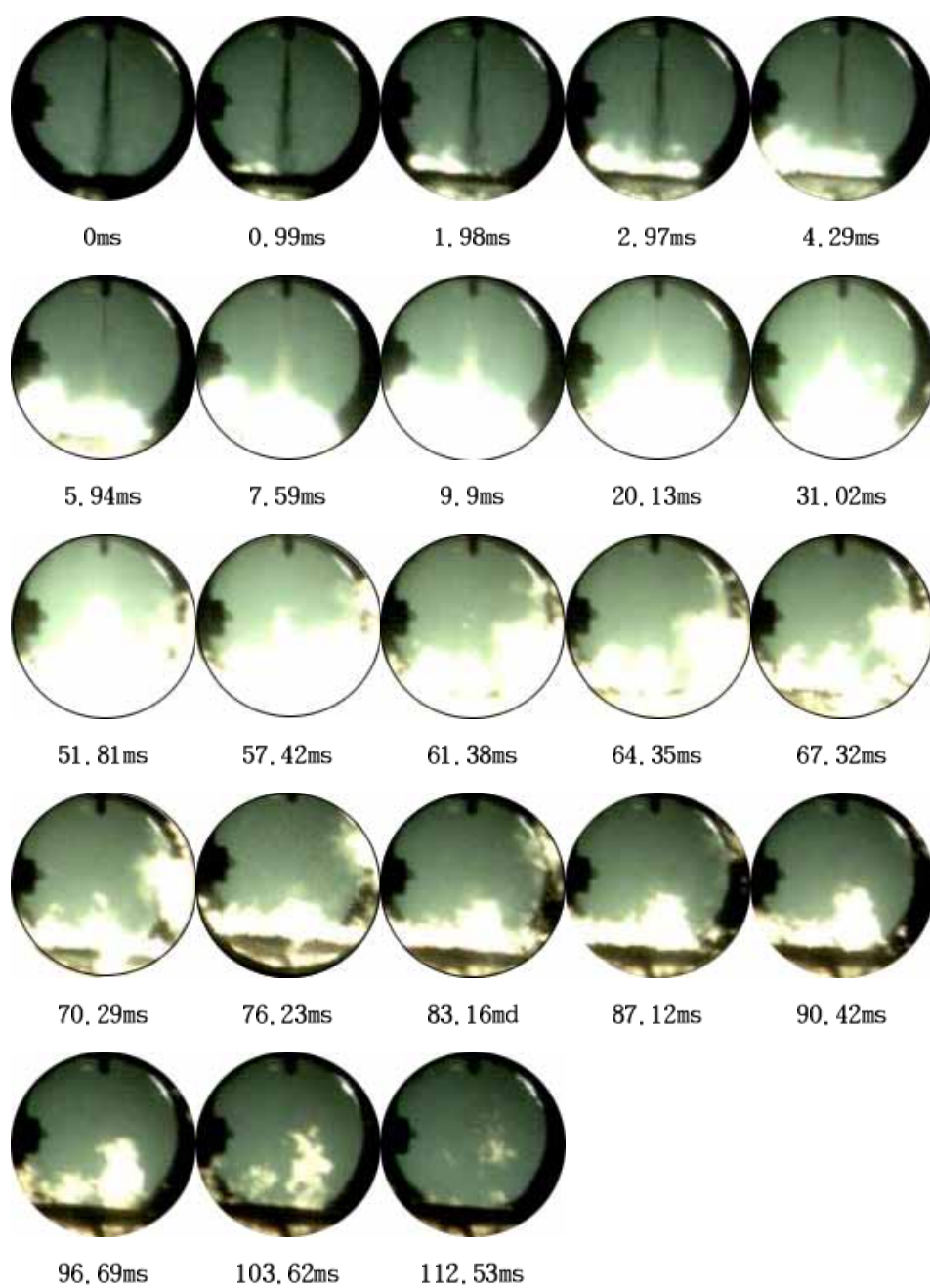


Fig. 4.40 Diesel flame development and termination  
(Rail pressure 15MPa–Trap pressure 1.0MPa)

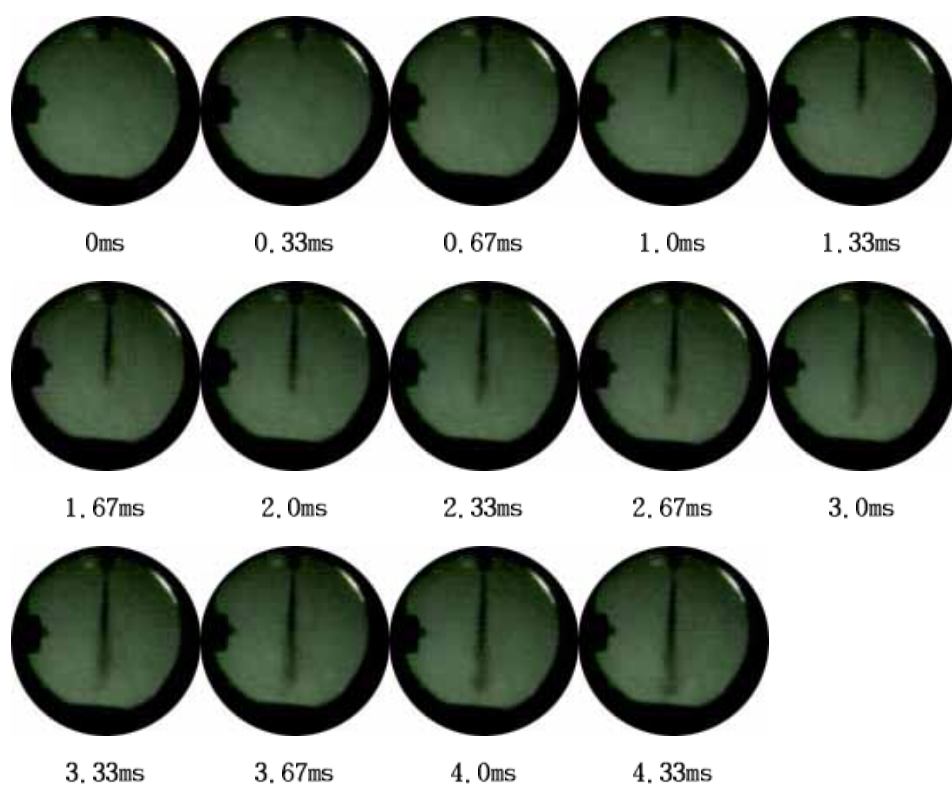


Fig. 4.41 Diesel spray development  
(Rail pressure 25MPa-Trap pressure 1.0MPa)



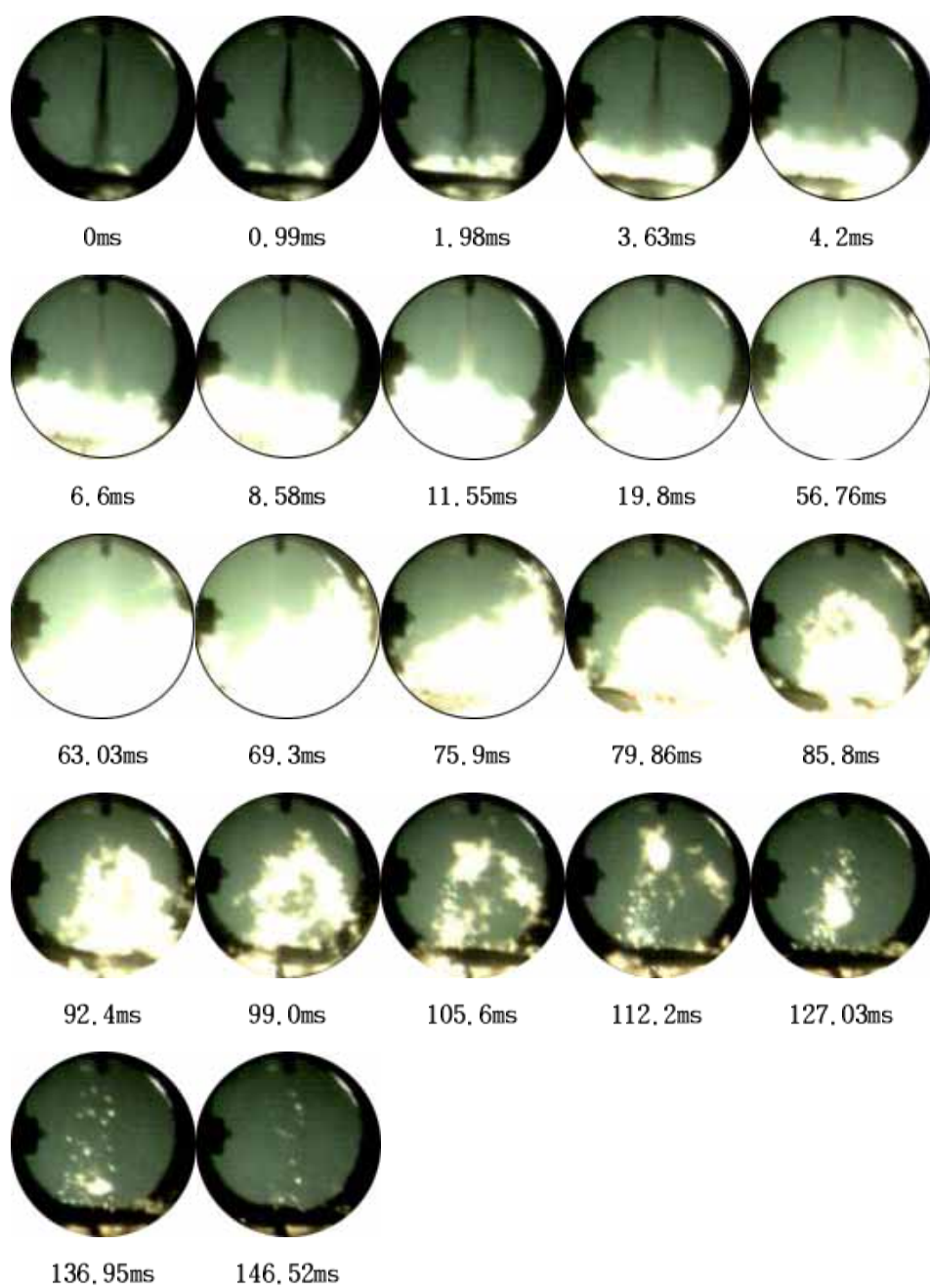


Fig. 4.42 Diesel flame development and termination  
(Rail pressure 25MPa–Trap pressure 1.0MPa)

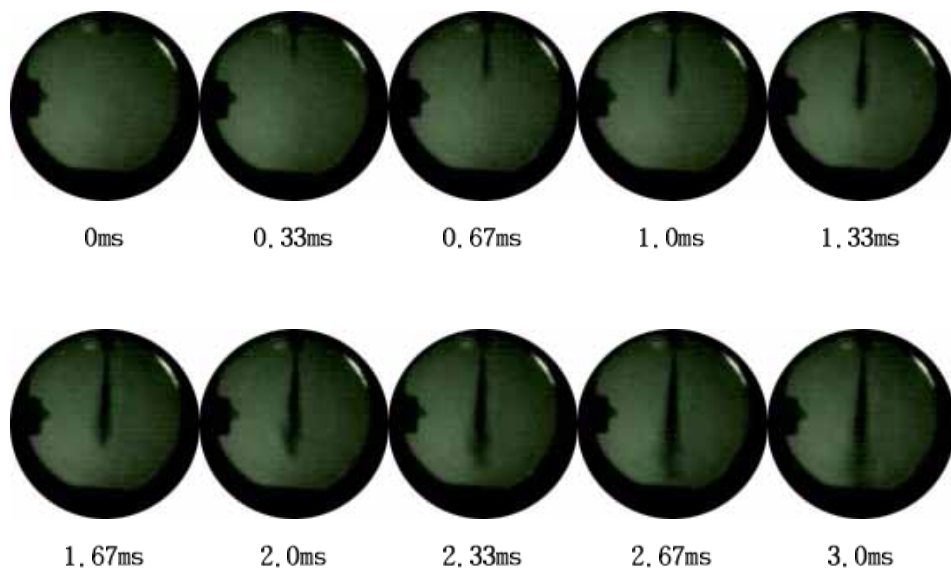


Fig. 4.43 Diesel spray development  
(Rail pressure 50MPa–Trap pressure 1.0MPa)

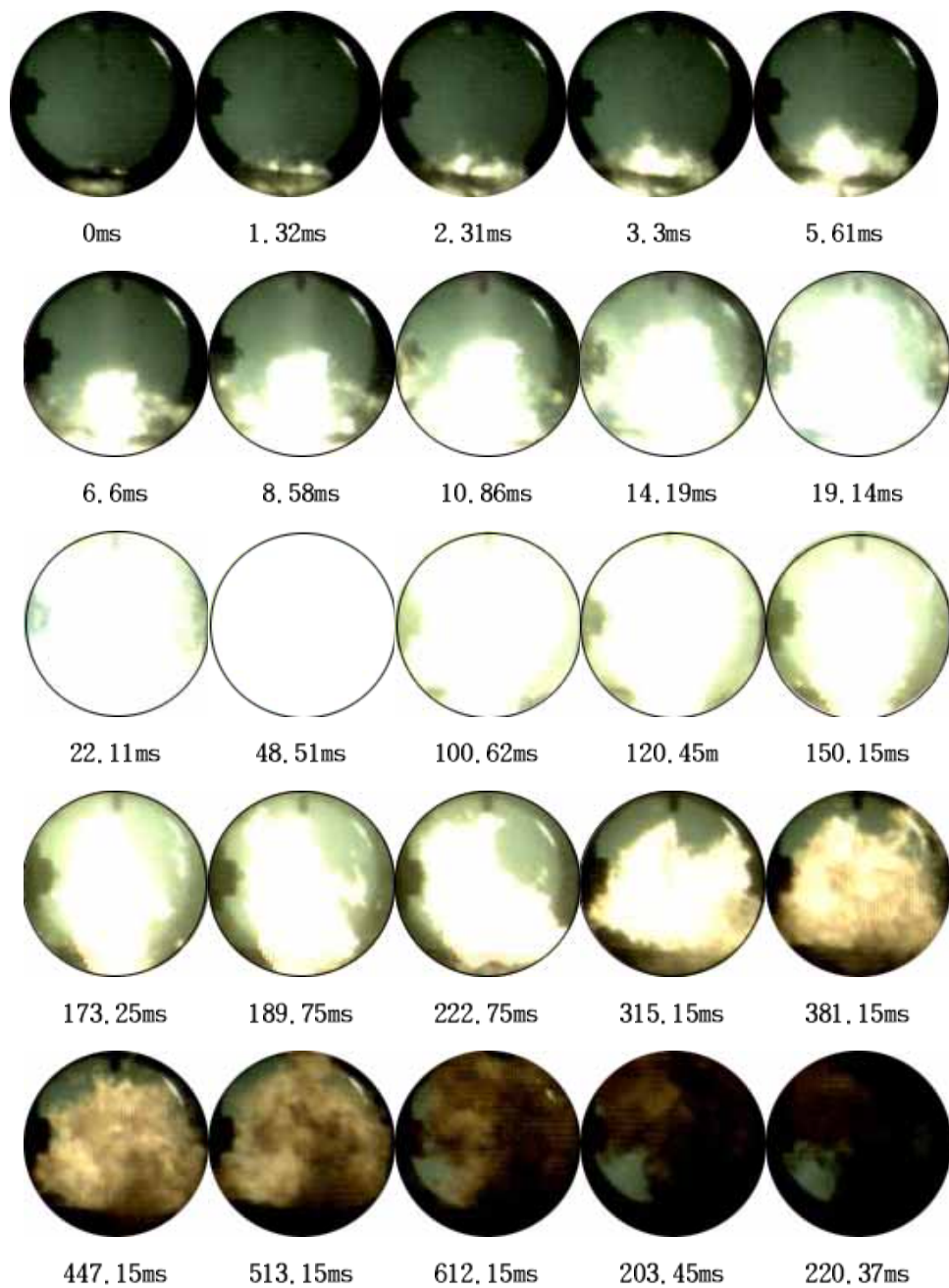


Fig. 4.44 Diesel flame development and termination  
(Rail pressure 50MPa-Trap pressure 1.0MPa)

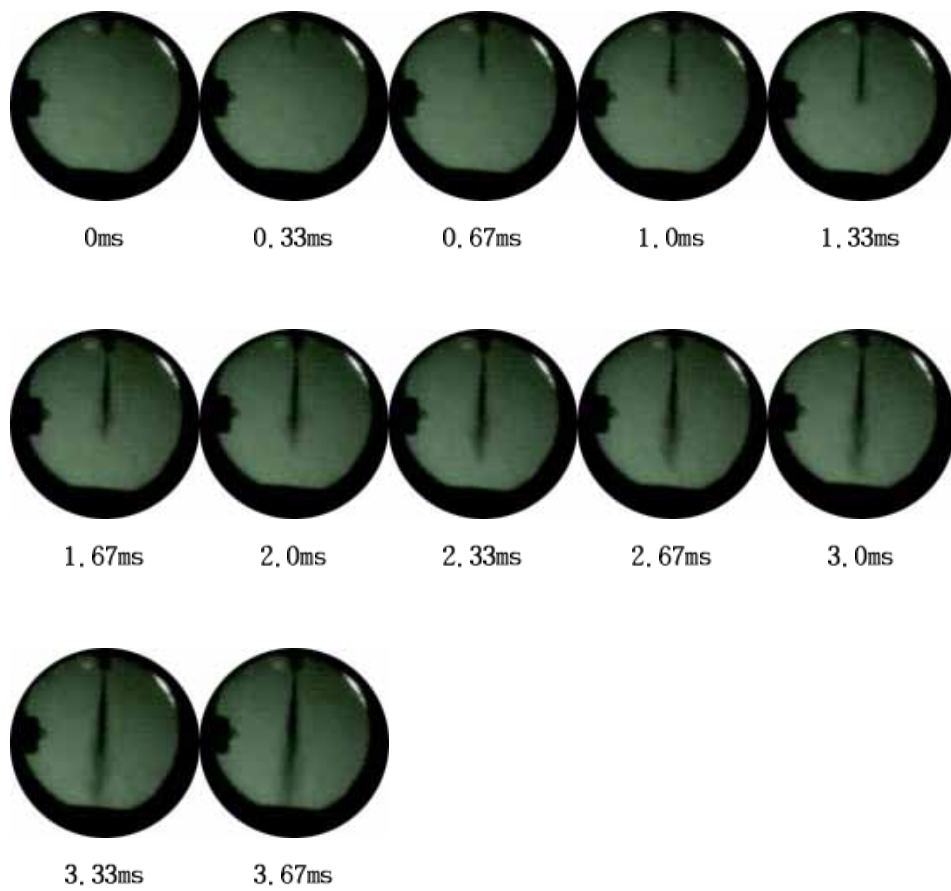


Fig. 4.45 Diesel spray development  
(Rail pressure 100MPa-Trap pressure 1.0MPa)

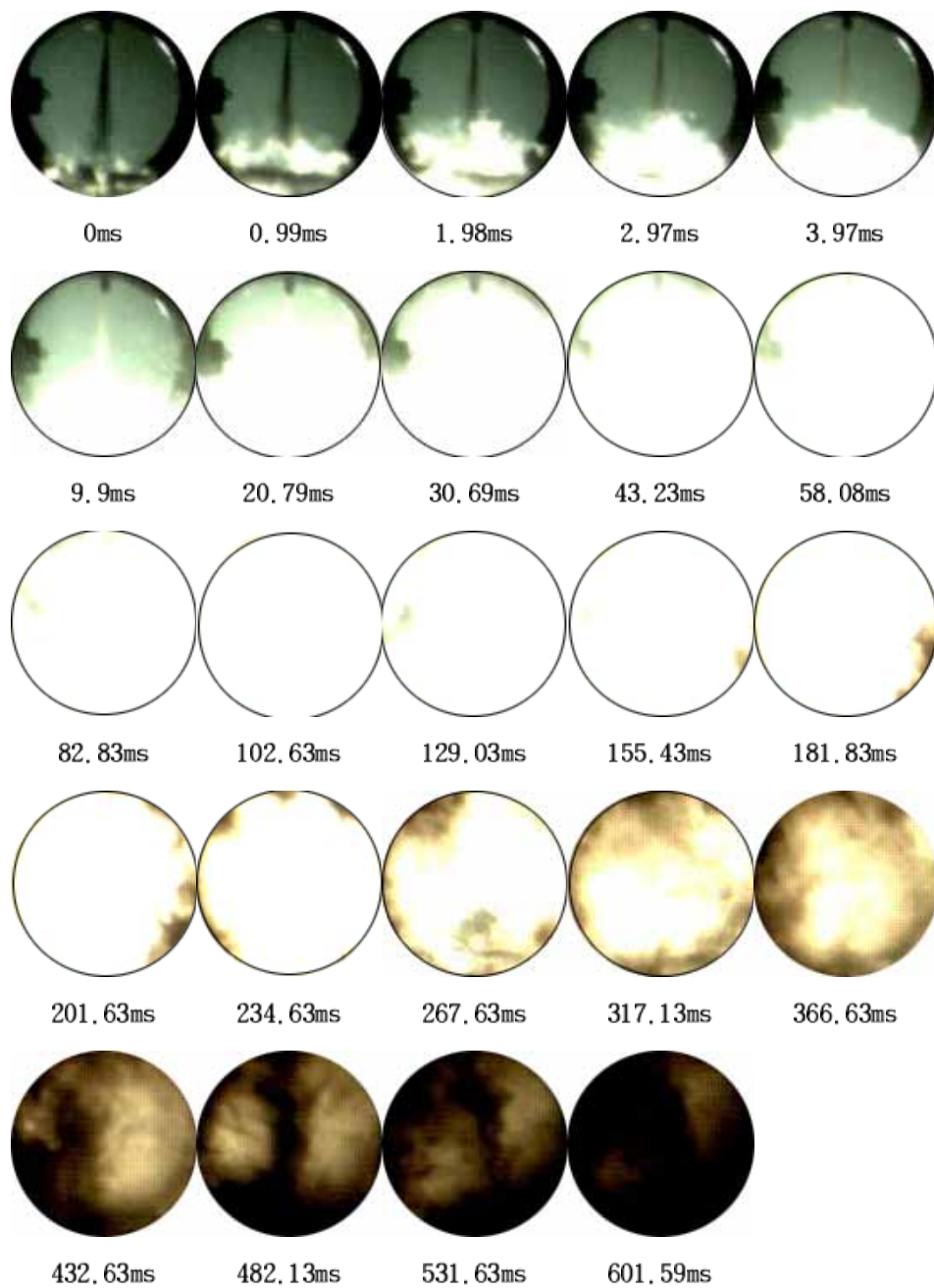


Fig. 4.46 Diesel flame development and termination  
(Rail pressure 100MPa–Trap pressure 1.0MPa)

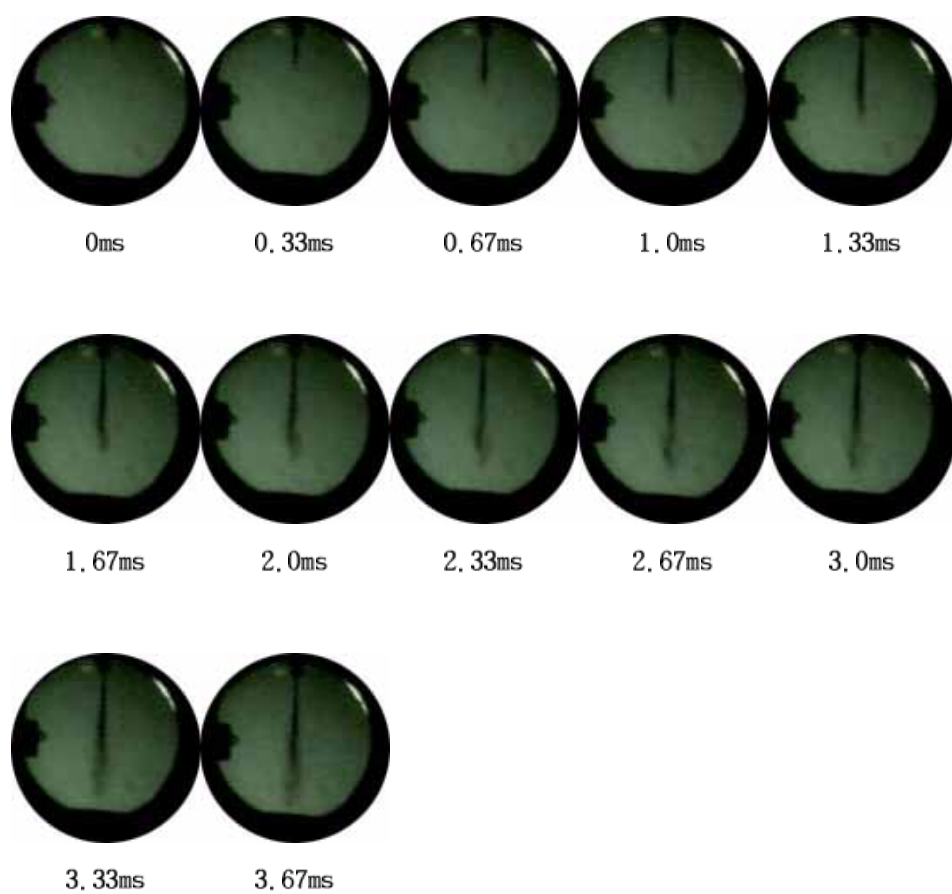


Fig. 4.47 Diesel spray development  
(Rail pressure 150MPa-Trap pressure 1.0MPa)



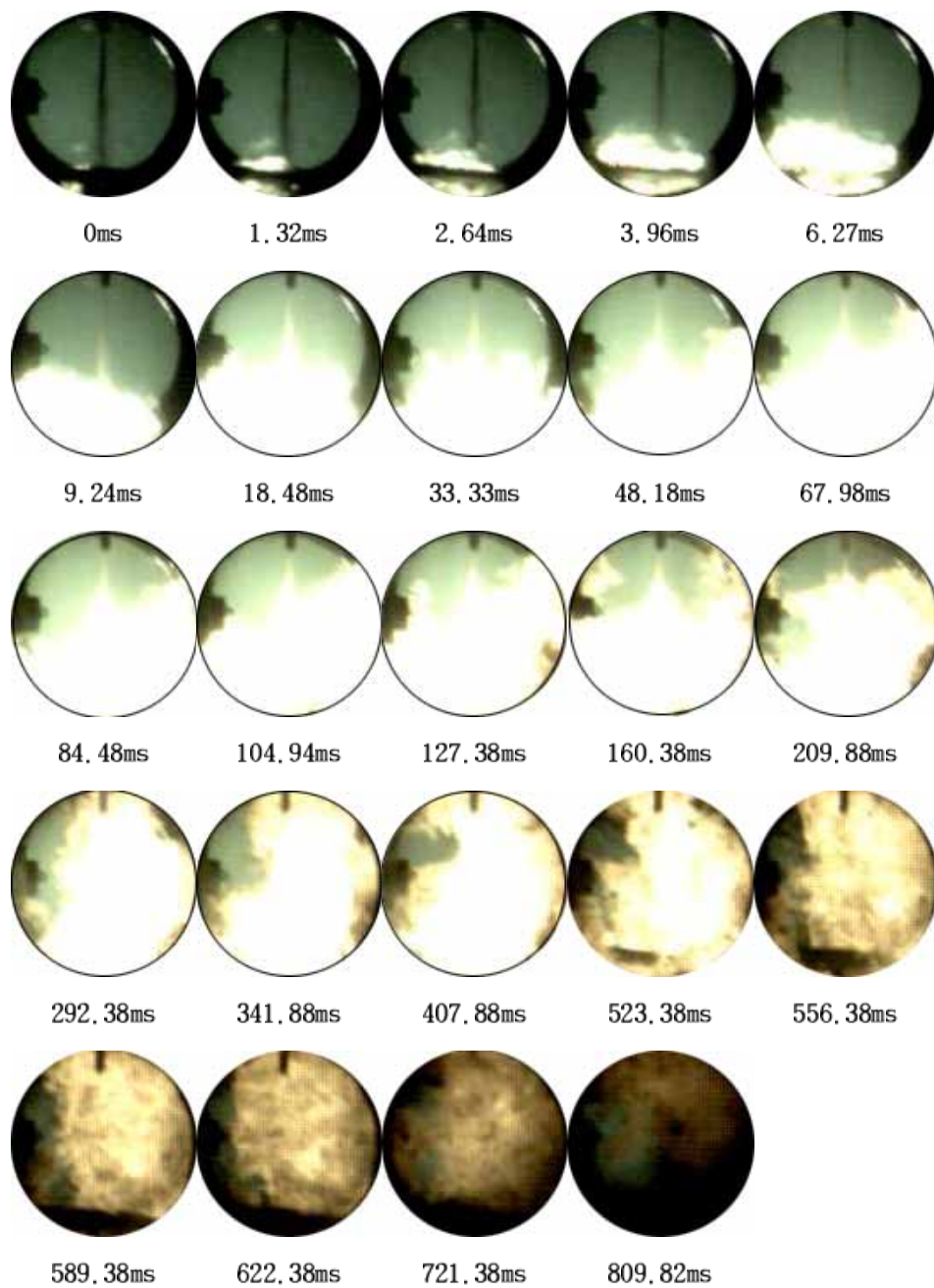


Fig. 4.48 Diesel flame development and termination  
(Rail pressure 150MPa-Trap pressure 1.0MPa)

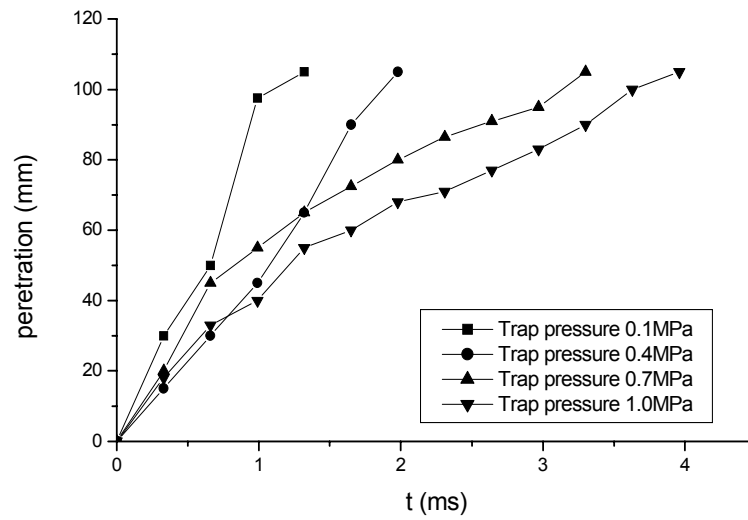


Fig. 4.49 Spray tip penetration at rail pressure of 10MPa

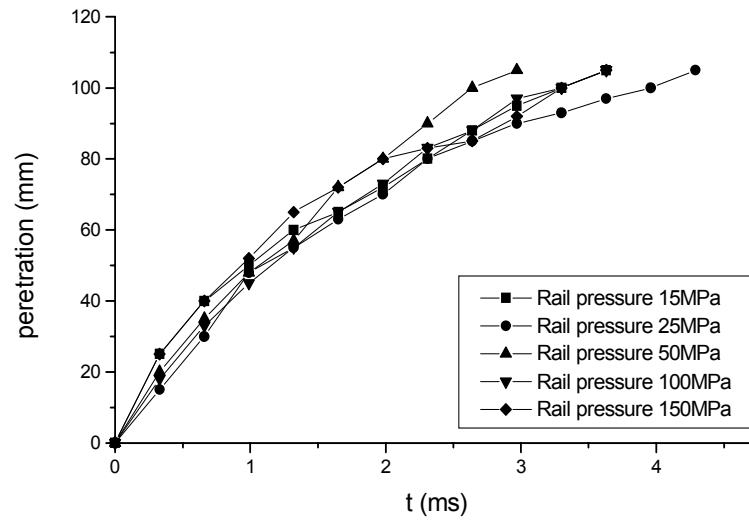


Fig. 4.50 Spray tip penetration at Trap pressure of 1.0MPa



## 4.4 LPG, 가솔린, 디젤의 분무연소 비교

### 4.4.1 분무와 착화특성

Fig. 4.51은 분사압력 10MPa일 때 분위기 압력이 0.1, 0.4, 0.7, 1.0MPa인 경우 분무선단이 분사노즐로부터 105mm 떨어진 충돌면에 도달할 때까지 걸리는 시간을 나타낸다. 가솔린과 디젤연료의 경우에는 분위기 압력이 증가하면서 충돌면에 도달하는 시간이 선형적으로 증가됨을 볼 수 있는데 이는 분위기 압력과 밀도 증가에 의한 유동저항증가의 영향으로 인하여 도달하는 시간이 증가되는 것으로 보여진다. 그러나 LPG는 분위기 압력이 0.1MPa인 대기압의 경우는 충돌면까지의 도달 시간이 길고 더 높은 압력의 경우 오히려 줄어드는데 이 경우는 LPG 증발 특성에 의하여 설명되어 질 수 있다. 즉 분위기 압력이 낮은 0.1MPa의 경우에는 10MPa로 압축되어진 LPG 연료가 분사된 후 분사 액체 온도의 포화압력보다 낮은 압력 상태로 급속히 노출이 이루어지기 때문에 전체 분사액적이 급속히 증발되어 확산됨으로써 분무의 진행이 정상적으로 이루어지지 못하기 때문이다. 분위기 압력이 증가되면 이러한 급속 증발현상의 특성은 볼 수 없고 분무 거동 또한 가솔린이나 디젤의 경우와 비슷하게 된다. Fig. 4.52는 분위기 압력의 증가에 따른 분무가 분무선단의 충돌면에 도달했을 때부터 연소시작까지의 착화지연기간을 보여준다. 주위조건이 점화지연기간에 미치는 영향은 점화에너지에 미치는 영향을 분석함으로써 이해될 수 있다. 점화에 필요한 점화에너지는 ①연료의 종류(비열) ②분위기 압력 ③분위기 온도 및 ④열확산도에 크게 영향을 받는다. LPG를 가솔린이나 디젤과 비교하면, 상온 298K에서 1/5정도의 적은 점화에너지(Isooctane 27mJ, Propane 5.5mJ)가 요구되지만 열확산도가 크기 때문에( $E_{ign} \propto a^3$ ) LPG 연료가 점화

성능이 좋다고 할 수는 없다. 또한 분위기 압력과 온도가 높아지면 점화에너지가 급격히 줄어들기 때문에 주위 조건에 따라 점화 특성이 크게 바뀔 것으로 예상된다. 분위기 압력이 0.1MPa(대기압)일 때 LPG의 경우 점화에 실패하였고 가솔린과 디젤의 경우 매우 지연되어 점화되었다. 첫 번째 이유로 저압에서 열확산 증가에 의하여 높은 점화에너지가 필요했기 때문이며, LPG의 경우는 이외에 급속증발에 의한 낮은 온도 ( $-42^{\circ}\text{C}$ )의 영향과 증발연료가 점화점인 Heating Coil 주위에 충분히 공급되지 못했기 때문에 점화에 실패한 것으로 생각된다. 분위기 압력 0.4MPa인 경우 점화특성이 모두 향상되었으며 특히 LPG는 매우 향상되어 가솔린과 디젤에 비하여 10배 이상 착화시간이 단축된다. 분위기 압력이 1.0MPa가 되면 차이가 줄어들는데, 디젤과 가솔린의 경우와 같이 유사한 수준이 된다. 이상은 증발특성, 분위기 온도, 열확산도 등의 영향이 종합적으로 반영된 결과이다.

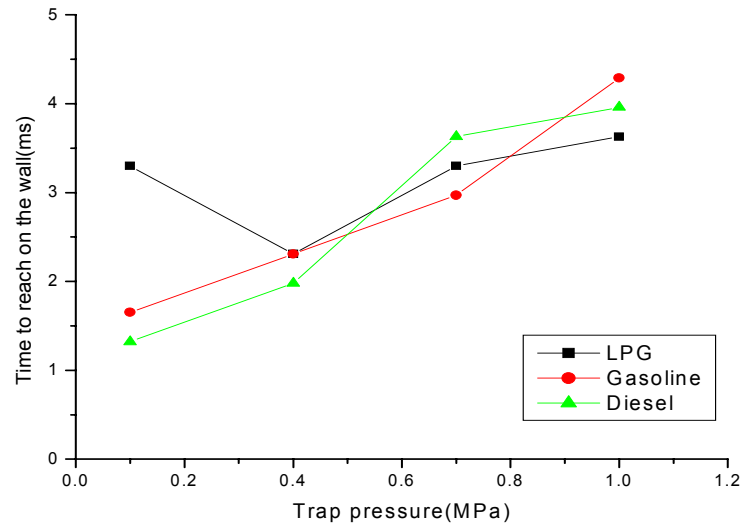


Fig. 4.51 Comparison of times to reach on the wall for LPG Gasoline and Diesel fuels

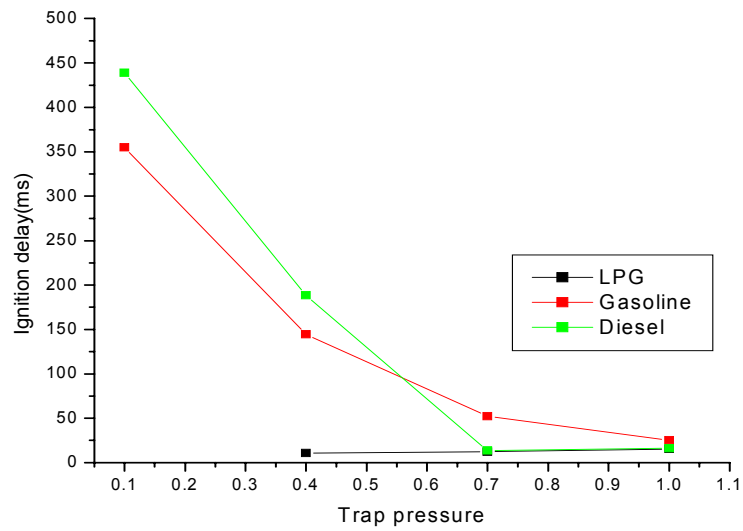


Fig. 4.52 Comparison of ignition delays for LPG, Gasoline and Diesel fuels

#### 4.4.2 연소특성

LPG의 대기압에서의 연소특성은 LPG의 급속증발로 인하여 고속카메라로 가시화 할 수 없을 정도의 미약한 연소를 보여주며, 가솔린, 디젤의 경우는 분무가 Heating Coil에 충돌한 후에 작은 액적들로 분열되어 연소실 전체로 튕겨 나가면서 전 연소실에서 조각화염형태로 화염이 분포된다. 또한 연소가 활성화 되지 못하고 불완전 연소되어 연소 종료 후에 많은 미연가스가 존재하는 것을 볼 수 있다.



Fig. 4.53 Flames just before termination

Fig. 4.54는 분위기 압력이 0.4MPa에서의 각 연료의 연소특성을 보여주고 있다. LPG의 경우 가솔린, 디젤과 비교하여 빠른 연소를 보이지만, 화염영역이 작은 것은 화염의 전파속도는 빠르지만 밀도가 작기 때문이다. 연료는 주로 분포하고 있는 충돌면에서 화염이 시작하여 분무축이 있는 곳으로 타고 오르는 연소특성을 보여 준다. 모든 연료의 경우에 대해서 비교적 양호한 연소와 함께 연소 종료 후에도 미연가스나 soot가 거의 없음을 알 수 있다.



Fig. 4.54 Flames just before termination

Fig. 4.55는 분위기 압력이 증가한 0.7MPa에서의 각 연료분사 후 화염이 소멸될 때까지의 연소사진을 보여주고 있다. 분위기 압력이 증가하면 분무연료의 증발이 둔화되고 충돌 후 액적의 분산이 줄어들면서 많은 연료가 충돌면을 중심으로 분포하여 밝은 화염이 이곳에 집중적으로 나타나며 연소 후에도 미연가스가 많이 분포함을 알 수 있다. LPG의 경우는 비교적 청정하고 디젤과 가솔린의 경우는 크고 작은 화염면으로 분산되어 연소가 소멸되고 있는 것을 알 수 있으며 가시화창으로 많은 Soot가 보여진다.



Fig. 4.55 Flames just before termination

## V. 結 論

분사압력과 분위기 압력 변화에 따른 LPG 연소를 정적연소기내에서 분석한 본 논문을 요약하면 다음과 같다.

### 1. 분사압력에 따른 분무특성

분사압력이 낮은 경우 분사직후의 LPG분무는 넓게 분포하지만 압력의 증가와 함께 초기 분무폭과 분무진행거리가 가솔린, 디젤과 비교하여 급격히 감소하며 분무끝단이 넓게 확산된다.

### 2. 분위기 압력에 따른 분무특성

대기압 상태에서의 LPG 분무는 가솔린, 디젤과 달리 분무의 진행이 매우 느리며 분무의 축 또한 명확하지 못하다. 하지만 분위기 압력이 증가할수록 다른 연료와 같이 분무 진행거리와 폭 방향으로의 퍼짐이 증가한다.

### 3. 저압분위기에서의 연소특성

분사압력이 매우 낮은 0.1MPa의 경우 분사된 LPG 연료는 급속한 증발로 온도가 급강하하고 분무가 넓게 분산됨으로써 연소실 하단 중앙에 설치된 점화원에 연소에 충분한 연료를 공급하지 못하여 점화에 어려움이 있었다. 0.4MPa의 경우 주위 공기압의 증가로 연소에 필요한 많은 연료가 점화원까지 진행된다. 점화원으로부터 활발한 연소가 시작되며 화염이 연소실 중앙부위까지 진행이 된 후 소멸하며 전체적으로 미연가스나 soot가 디젤, 가솔린과 비교하여 현저하게 작은 것을 알 수 있었다.

#### 4. 고압분위기에서의 연소특성

고압분위기 압력인 0.7, 1.0MPa의 경우 압력의 증가와 함께 분무진행과정에서 연료의 증발이 줄어들면서 많은 연료들이 주로 충돌면 부위에 머무르며 저압분위기와는 달리 연소가 넓은 부위로 확산되어 활발한 연소를 나타내고 화염의 강도도 더욱 증가한다. 저압분위기와 마찬가지로 디젤과 가솔린은 화염의 종료 후 흑갈색 화염을 보이며 soot의 생성이 많음을 나타내었고 연소시작과 화염소멸의 시간이 LPG연료와 비교하여 오랜 기간동안 연소하는 것을 보여준다.

#### 5. 결과 및 엔진적용시의 예상특성

이상의 결과를 종합하면 5MPa정도의 낮은 분사압력으로 연소실에 LPG를 직접 분사하는 경우 분사된 분무 연료는 주위 유동에 매우 민감하기 때문에 점화플러그 주변에 안정된 혼합기를 형성하기 위한 기술이 요구된다. 특히 고속 고부하 영역과 같이 분사시기가 빠른 경우(early injection)에는 분위기 압력이 낮기 때문에 전체 급속증발효과에 의한 분무 확산 거동특성을 고려하여야 한다. LPG 연료의 빠른 증발 특성은 디젤과 같은 고속 분사에 적용하였을 때 퇴적 현상을 줄이고 미연가스나 soot의 발생을 억제하기 때문에 고속 소형 엔진에 적용시 효과적인 유해 배출물 저감 및 에너지 효율 향상이 기대된다.

## 參考文獻

- [1] M. L. Poulton, Alternative Fuels for Road Vehicles, Computational Mechanics Publications, UK & USA, 1994.
- [2] 이지근, 이한봉, 강신재, 노병준, “흡기다기관 형상변화가 3기통 LPG엔진의 토크특성에 끼치는 영향에 관한 실험적 연구“, 한국자동차공학회논문집 제5권 제6호 pp.175~182, 1997.
- [3] B. Hollemans, Technical Reference Paper, TNO Road Vehicle Research Institute, 1999.
- [4] A. Lowi Jr. and W. P. L. Carter, "A Method for evaluating the atmospheric ozone impact of actual vehicle emissions", SAE paper 900710, 1990.
- [5] William J.Smith, David J.Timoney, and Dermor P.Lynch "Emissions and Efficiency Comparison of Gasoline and LPG Fuels in a 1.4Liter Passenger Car Engine", SAE paper 972970, 1997.
- [6] Cleaner fuel conversion of leased cars to run on liquid propane, Rushmoor Borough Council, UK, 1998.
- [7] A proposal to introduce LPG taxis, Planning, Environment and Lands Bureau, HK, 1999.
- [8] R. Sierens, "An experimental and theoretical study of liquid LPG injection", SAE paper 922363, 1992.
- [9] 오승묵, 김창엽, 강건용, “대형엔진용 액상 분사식 LPG 연료공급방식에 대한 기초연구(1)“, 한국자동차공학회논문집 제9권 제 4호, pp.85~91.



- [10] R. Brown and J. L. York, "Spray formed by flashing liquid jet",  
AIChE-Journal, vol. 8(2), pp. 149-153, 1962.
- [11] H. Fusimoto, Y. Iwami and J. Senda, "Atomization characteristics of  
liquefied n-Butane spray with flash boiling phenomena", Pro. of  
ICLASS-'97 Seoul, 1997.
- [12] 조규백, 정동수, "직접분사식기관 적용을 위한 LPG연료의 실린더내  
분무특성에 관한 연구", '99춘계자동차공학회논문집 pp76-81, 1999.
- [13] 김우석, 이종화, "흡기포트 분사식 LPG엔진의 연료량 제어 및 연소특성  
에 관한 연구", 한국자동차공학회 논문집 제 8권 제 6호, pp.31~39.  
2000.
- [14] 서영호, 강우, "중형상용차량용 LPG엔진의 개발에 관한 연구", 한국  
자동차공학회논문집 제8권 제 5호, pp.1~11. 2000.
- [15] Xiaobo Sun, Tom Wiedmann, and Syed Hussain "Fuel Management  
and Exhaust Emissions of Light-and Heavy-Duty Trucks  
Operating on CNG and LPG", SAE paper 971661, 1997.
- [16] E.Robert Fanick and Kevin A.Whitney, Brent K.Bailey "Particulate  
Characterization Using Five Fuels", SAE paper 961098, 1996.

## 감사의 글

처음 학교에 들어와서 새로운 환경에 어떻게 적응할지 몰라서 걱정하는 마음이 많았었는데 이제 졸업이라니.. 제 인생에서 중요한 부분을 차지할 2년이라는 짧은 시간에서 다른 환경에서도 얻지 못할 중요한 경험과 지식을 얻도록 해준 분들에게 감사 드립니다. 아무것도 모르던 저에게 아버지와 같이 따뜻하게 바른길로 이끌어주신 박 권하 교수님께 가장 먼저 고개 숙여 감사 드립니다. 부족한 저의 논문을 심사해 주신 최 재성 교수님과 정 동수 박사님께도 감사의 말을 올립니다.

제가 실험실에서 외롭게 지내지 않도록 많은 기쁜일과 슬픈일을 같이 해준 의리의 사나이 현철, 멀리 서울에 있지만 멋진 친구 인석, 밝은 마음씨를 가진 착한 상무, 여자 많고 인기 좋은 진희, 운동 좋아하고 활발한 성격의 재혁, 계획성 있고 불임성 좋은 석민, 구박을 받으면서도 우리를 챙겨주는 승우, 우리 실험실의 청초한 꽃과 같은 존재 인선, 짧은 만남 좋은 후배인 주용, 종구, 영주, 많은 사람들에게 감사의 마음을 전합니다. 그리고 대학원 생활을 하는 동안 도움을 주신 임희성형에게도 감사합니다. 동향의 학교 선배이시며 항상 바쁘신 가운데에서도 저에게 조언을 주시는 이 화순 교수님과 인생을 살아가는데 많은 경험을 쌓게 해주신 푸근한 아저씨인 박 홍일 원장님, 밝은 미소의 송 영호 이사님, 멀리 경주의 김재곤 선생님께도 감사하며 하시는 일이 잘되기를 진심으로 바랍니다.

한국기계연구원에서 도움을 주신 최 교남 선생님께도 감사 드리며 건강하시기를 바랍니다. 멀리 있는 제가 찾아가면 한잔의 술과 기운을 불어 넣어주던 제 소중한 친구들에게도 감사 드립니다.

제가 한사람의 성인으로 자랄 수 있도록 많은 질타와 눈물과 지원을 아끼지 않으신 저의 아버지와 어머님께 말로 표현을 할 수 없는 감사를 드립니다. 항상 멀리서 저를 마음속으로 기원해주는 예쁘고 착한 저의 동생들에게도 감사합니다.

제가 글로 표현하지 못한 저의 고마운 사람들과 저를 아는 모든 분들이 좋은 일이 계속되기를 기원하며 이 논문을 바칩니다.

2002년 6월 28일

蘇秉斗